

GRADO EN
INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO Y AJUSTE DE UNA
PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE UN
TRANSFORMADOR DE POTENCIA***

Equipo de Proyecto:

Alumno: García Hueso, Iker

Director: Uriondo Arrue, Felipe

Curso: 2019-2020

Fecha: Bilbao, 17 de julio, 2020

Resumen

El objetivo de este trabajo fin de grado es diseñar y ajustar la protección diferencial de un transformador de potencia situado entre la red de transporte y distribución de un sistema eléctrico de potencia. Para ello, se ha empleado el software de cómputo matemático Matlab con el que se ha efectuado la simulación correspondiente de la línea junto a la protección instalada en ella. Primeramente, se exponen los conceptos teóricos relativos a una protección diferencial de transformador para, después, realizar la simulación oportuna e incluir una serie de ensayos ante faltas para comprobar el correcto funcionamiento de la misma.

Palabras clave: *Protección diferencial, intensidad diferencial, discriminación por armónicos.*

Abstract

The aim of this final degree project is to design and set the differential protection of a power transformer located between transmission and distribution lines of an electrical power system. For this reason, Matlab mathematical computing software has been used in order to carry out the corresponding simulation of the line together with the protection installed on it. First, theoretical concepts related to a transformer differential protection are exposed so as to perform later the suitable simulation as well as a set of fault tests to check the protection.

Key words: *Differential protection, differential current, harmonic discrimination.*

Laburpena

Gradu amaierako lan honen helburua transmisio eta banaketa sarearen artean dagoen potentzia transformadore baten babes diferentziala diseinatu eta doitzea da. Horretarako, Matlab informatikako softwarea erabili da eta horren bitartez, lerroari dagokion simulazioa bertan instalatutako babesmenarekin batera egin da. Lehenik eta behin, transformadorearen babes diferentzialari buruzko kontzeptu teorikoak azalduko dira, ondoren, beharrezko simulazioa egiteko eta testeari ezin denez, baita honen entsegu saila bat ere.

Hitz gakoak: *Babes diferentziala, intentsitate diferentziala, diskriminazio armonikoa.*

INDICE DE CONTENIDOS

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 8 |
| 2 | CONTEXTO | 9 |
| 2.1 | SISTEMAS DE PROTECCIÓN | 9 |
| 3 | OBJETIVOS Y ALCANCE | 11 |
| 4 | BENEFICIOS | 12 |
| 5 | CONTEXTUALIZACIÓN TEÓRICA | 13 |
| 5.1 | LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL | 13 |
| 5.1.1 | FACTORES QUE AFECTAN A LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL | 14 |
| 5.1.2 | CURVA DE DISPARO TÍPICA DE UNA PROTECCIÓN DIFERENCIAL | 22 |
| 5.1.3 | DISCRIMINACIÓN POR ARMÓNICOS | 23 |
| 5.1.4 | PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TIERRA RESTRINGIDA | 33 |
| 5.1.5 | CÁLCULOS DE LA PROTECCIÓN | 34 |
| 5.2 | OTRAS PROTECCIONES DEL TRANSFORMADOR | 36 |
| 5.2.1 | PROTECCIÓN BUCHHOLZ | 36 |
| 5.2.2 | SUDDEN PRESSURE RELAY SPR | 38 |
| 6 | DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO | 39 |
| 6.1 | SIMULACIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL | 39 |
| 6.1.1 | MODELO DE RED SIMULADO | 39 |
| 6.1.2 | MODELO DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL | 41 |
| 6.2 | ENSAYO ANTE FALTAS | 54 |
| 6.2.1 | FALTAS INTERNAS | 54 |
| 6.2.2 | FALTAS EXTERNAS | 59 |
| 6.2.3 | ENERGIZACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA | 63 |
| 6.2.4 | SOBREEXCITACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA | 66 |
| 7 | DESCRIPCIÓN DE TAREAS | 70 |
| 7.1 | DIAGRAMA DE GANTT | 71 |
| 8 | ANÁLISIS DE COSTES | 72 |
| 8.1 | COSTE DE PERSONAL | 72 |
| 8.2 | AMORTIZACIONES | 72 |
| 8.3 | OTROS GASTOS | 72 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 8.4 | COSTES INDIRECTOS | 73 |
| 8.5 | PRESUPUESTO | 73 |
| 9 | CONCLUSIONES | 74 |
| 10 | BIBLIOGRAFÍA | 75 |
| 11 | ANEXOS | 76 |
| 11.1 | ANEXO I. ESPECIFICACIONES DEL MODELO SIMULADO | 76 |
| 11.2 | ANEXO II. FALTAS ENSAYADAS | 81 |
| 11.2.1 | FALTAS INTERNAS | 82 |
| 11.2.2 | FALTAS EXTERNAS | 85 |
| 11.3 | ANEXO II. MANUALES | 88 |
| 11.3.1 | MANUAL DE MATLAB SIMULINK | 88 |
| 11.3.2 | MANUAL DE MICROSOFT OFFICE | 88 |
| 11.3.3 | MANUAL DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR | 88 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Protección diferencial de transformador | 13 |
| Figura 2 Funcionamiento de la protección diferencial ante falta externa..... | 14 |
| Figura 3 Funcionamiento de la protección diferencial ante falta interna..... | 14 |
| Figura 4 Energización de transformador monofásico en vacío..... | 15 |
| Figura 5 Intensidad de vacío real. | 15 |
| Figura 6 Rama de vacío del transformador | 16 |
| Figura 7 Sistema Eléctrico de Potencia. | 17 |
| Figura 8 Ejemplo de conexión de transformador..... | 18 |
| Figura 9 Método de Phasing..... | 19 |
| Figura 10 Equivalencia de notaciones | 20 |
| Figura 11 Fase A | 21 |
| Figura 12 Fase B..... | 21 |
| Figura 13 Fase C..... | 21 |
| Figura 14 Curva de disparo de la protección..... | 22 |
| Figura 15 Onda de cortocircuito descompuesta | 24 |
| Figura 16 Onda de cortocircuito típica | 24 |
| Figura 17 Onda de intensidad diferencial tras un cortocircuito | 24 |
| Figura 18 Armónico fundamental de la intensidad diferencial..... | 25 |
| Figura 19 Segundo armónico de la intensidad diferencial | 25 |
| Figura 20 Quinto armónico de la intensidad diferencial..... | 26 |
| Figura 21 Curva de primera imantación | 26 |
| Figura 22 Intensidad diferencial medida en TAPs | 27 |
| Figura 23 Armónico fundamental | 28 |
| Figura 24 Segundo armónico..... | 28 |
| Figura 25 Quinto armónico | 29 |
| Figura 26 Onda de tensión | 29 |
| Figura 27 Ciclo de Histéresis..... | 29 |
| Figura 28 Flujo magnético durante la conexión del transformador | 30 |
| Figura 29 Intensidad diferencial de la onda de corriente de conexión..... | 31 |
| Figura 30 Armónico fundamental | 31 |
| Figura 31 Segundo armónico..... | 32 |
| Figura 32 Tierra restringida | 33 |
| Figura 33 Ejemplo transformador | 34 |
| Figura 34 Esquema Buchholz..... | 36 |
| Figura 35 Relé Buchholz | 37 |
| Figura 36 Protección Buchholz | 37 |
| Figura 37 Esquema SPR | 38 |
| Figura 38 Modelo de la simulación I | 39 |
| Figura 39 Modelo de la simulación II | 41 |
| Figura 40 Modelo de la simulación III | 42 |
| Figura 41 Valores de los datos utilizados | 42 |
| Figura 42 Cálculo intensidad diferencial | 43 |
| Figura 43 Intensidades de primario..... | 43 |
| Figura 44 Intensidades de secundario..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 45 Onda de diferencia de intensidades entrantes y salientes a los TIs..... | 45 |
| Figura 46 Cálculo del armónico fundamental | 45 |
| Figura 47 Función de la intensidad diferencial..... | 46 |
| Figura 48 Función de la intensidad de paso | 46 |
| Figura 49 Armónico fundamental de la intensidad diferencial..... | 46 |
| Figura 50 Armónico fundamental de la intensidad de paso | 47 |
| Figura 51 Cálculo de segundo y quinto armónico de la onda de intensidad diferencial | 47 |
| Figura 52 Segundo armónico de la intensidad diferencial | 48 |
| Figura 53 Quinto armónico de la intensidad diferencial..... | 48 |
| Figura 54 Función de disparo | 49 |
| Figura 55 Curva de disparo..... | 50 |
| Figura 56 Modelo de la orden de disparo | 50 |
| Figura 57 Función de bloqueo por segundo armónico | 50 |
| Figura 58 Modelo del bloqueo por segundo armónico..... | 51 |
| Figura 59 Función de bloqueo por quinto armónico..... | 51 |
| Figura 60 Modelo de bloqueo por quinto armónico..... | 51 |
| Figura 61 Salidas de las funciones descritas..... | 52 |
| Figura 62 Esquema de la orden de disparo | 53 |
| Figura 63 Falta monofásica interna en la fase A | 55 |
| Figura 64 Onda de intensidad diferencial | 55 |
| Figura 65 Armónico fundamental de la I diferencial y la I de paso | 56 |
| Figura 66 Segundo y quinto armónico de la intensidad diferencial..... | 57 |
| Figura 67 Funciones de disparo y bloqueo..... | 57 |
| Figura 68 Orden de disparo..... | 58 |
| Figura 69 Intensidades de primario y secundario ante falta externa monofásica | 59 |
| Figura 70 Onda de intensidad diferencial | 59 |
| Figura 71 Armónico fundamental de la I diferencial e I de paso | 60 |
| Figura 72 Segundo y quinto armónico de la I diferencial..... | 61 |
| Figura 73 Funciones de disparo y bloqueo..... | 61 |
| Figura 74 Orden de disparo..... | 62 |
| Figura 75 Onda de intensidad diferencial | 63 |
| Figura 76 Armónico fundamental de la I diferencial e I de paso | 64 |
| Figura 77 Segundo y quinto armónico de la intensidad diferencial..... | 64 |
| Figura 78 Activación de disparo y bloqueo2 | 65 |
| Figura 79 Orden de disparo..... | 66 |
| Figura 80 Onda de intensidad diferencial | 66 |
| Figura 81 Armónico fundamental de la I diferencial y la I de paso | 67 |
| Figura 82 Segundo armónico de la intensidad diferencial | 67 |
| Figura 83 Quinto armónico de la intensidad diferencial..... | 68 |
| Figura 84 Activación de disparo y bloqueo 5 | 68 |
| Figura 85 Orden de disparo..... | 69 |
| Figura 86 Diagrama de Gantt | 71 |
| Figura 87 Fuente de tensión trifásica | 76 |
| Figura 88 Impedancias fuente | 77 |
| Figura 89 Interruptor..... | 78 |
| Figura 90 Transformador trifásico..... | 78 |

| | |
|--|----|
| Figura 91 Medidor de intensidad trifásico | 79 |
| Figura 92 Impedancia línea | 79 |
| Figura 93 Generador de faltas..... | 80 |
| Figura 94 Falta interna bifásica en fases A y B | 82 |
| Figura 95 Onda de intensidad diferencial | 82 |
| Figura 96 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso | 82 |
| Figura 97 Segundo y quinto armónico de I diferencial | 82 |
| Figura 98 Funciones de disparo y bloqueo..... | 82 |
| Figura 99 Orden de disparo..... | 82 |
| Figura 100 Falta interna bifásica a tierra entre fases A y B..... | 83 |
| Figura 101 Onda de intensidad diferencial | 83 |
| Figura 102 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso | 83 |
| Figura 103 Segundo y quinto armónico de I diferencial | 83 |
| Figura 104 Funciones de disparo y bloqueo..... | 83 |
| Figura 105 Orden de disparo..... | 83 |
| Figura 106 Falta interna trifásica..... | 84 |
| Figura 107 Onda de intensidad diferencial | 84 |
| Figura 108 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso | 84 |
| Figura 109 Segundo y quinto armónico de I diferencial | 84 |
| Figura 110 Funciones de disparo y bloqueo..... | 84 |
| Figura 111 Orden de disparo..... | 84 |
| Figura 112 Falta externa bifásica en fases A y B | 85 |
| Figura 113 Onda de intensidad diferencial | 85 |
| Figura 114 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso | 85 |
| Figura 115 Segundo y quinto armónico de I diferencial | 85 |
| Figura 116 Funciones de disparo y bloqueo..... | 85 |
| Figura 117 Orden de disparo..... | 85 |
| Figura 118 Falta externa bifásica entre A y B | 86 |
| Figura 119 Onda de intensidad diferencial | 86 |
| Figura 120 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso | 86 |
| Figura 121 Segundo y quinto armónico de I diferencial | 86 |
| Figura 122 Funciones de disparo y bloqueo..... | 86 |
| Figura 123 Orden de disparo..... | 86 |
| Figura 124 Falta externa trifásica..... | 87 |
| Figura 125 Onda de intensidad diferencial | 87 |
| Figura 126 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso | 87 |
| Figura 127 Segundo y quinto armónico de I diferencial | 87 |
| Figura 128 Funciones de disparo y bloqueo..... | 87 |
| Figura 129 Orden de disparo..... | 87 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Datos del modelo | 34 |
| Tabla 2 Entradas y salidas a la puerta AND | 53 |
| Tabla 3 Tabla de la verdad de un D-Latch | 53 |
| Tabla 4 Faltas ensayadas | 54 |
| Tabla 5 Resumen de tareas e hitos | 70 |
| Tabla 6 Costes de recursos humanos | 72 |
| Tabla 7 Amortizaciones | 72 |
| Tabla 8 Otros gastos | 73 |
| Tabla 9 Coste final | 73 |

INDICE DE ACRÓNIMOS

TFG: Trabajo de Fin de Grado

TI: Transformador de Intensidad

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia

RT: Relación de Transformación

SPR: Sudden Pressure Relay

1 INTRODUCCIÓN

Este documento recoge el diseño y ajuste de la protección diferencial de un transformador de potencia situado entre la red de transporte y distribución. La simulación se ha llevado a cabo a través de la utilización del software Matlab Simulink. El estudiante de grado Iker García Hueso ha sido el encargado de la realización del informe bajo la dirección del profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao Don Felipe Uriondo Arrue.

Primeramente, se recoge el contexto del trabajo, el cual se enmarca en el campo de protecciones del Sistema Eléctrico de Potencia. En él se proporciona una visión general acerca de las protecciones que otorga al sistema seguridad, elemento esencial a la hora de proporcionar electricidad.

A continuación, se incluye el alcance y, por consiguiente, los objetivos que se pretenden cumplir mediante la realización del presente documento. Se tratarán también, para continuar, los beneficios que se obtienen al diseñar una protección diferencial.

El grueso de la tarea toma inicio en la contextualización teórica del mismo. Para adquirir una comprensión relativa al tema que trata el presente documento es determinante atender a lo explicado en los diferentes puntos de esta sección ya que a priori una protección diferencial es sencilla de entender. Sin embargo, se dan diferentes factores que producen un aumento de la complejidad de la misma que serán clarificados debidamente. Además, se incluyen otras protecciones con las que cuenta un transformador a fin de garantizar su correcto funcionamiento.

Tras la contextualización teórica se procede a describir el modelo de la simulación realizada acerca de la protección diferencial de un transformador. Se proporciona una descripción acerca de la línea construida y se continúa detallando el modelo de la protección diferencial instalada sobre ella.

El siguiente paso radica en probar la simulación realizada y comprobar que actúa de forma correcta ante las diferentes a las que se le somete. Se verá como la protección efectúa el disparo en circunstancias de falta interna y lo bloquea ante faltas externas, así como para una sobreexcitación y conexión del elemento.

Asimismo, el documento cuenta con una descripción de las tareas realizadas para llevar a cabo este TFG. La secuencia de estas se muestra en el correspondiente diagrama de Gantt.

El coste derivado de la realización de este proyecto queda recogido en el presupuesto que se incluye en el punto siguiente.

Por último, se detallan una serie de conclusiones acerca de la protección implementada la cual da fin a este proyecto.

2 CONTEXTO

Este documento está directamente relacionado con el campo de la ingeniería eléctrica y el motor que hace que ésta se renueve y día a día siga en la lucha por la mejora constante que no es otra sino generar energía eléctrica de calidad. Hoy en día no cabe ningún tipo de duda que el hecho de disponer de electricidad para poder llevar a cabo actividades de cualquier tipo es primordial. Por ello asegurar su transporte y distribución es una tarea que ocupa gran parte del tiempo de un ingeniero.

Inicialmente, este trabajo venía motivado por un carácter meramente didáctico en aras de poner fin a una primera etapa en la Escuela de Ingeniería de Bilbao para poder continuar la formación realizando el Máster de Ingeniería Industrial. Sin embargo, la realización de este documento se enmarca en un contexto global claramente afectado por la situación de una pandemia global fruto del *COVID-19* la cual ha obligado a gran parte de la población a recluírse en sus casas durante cierto periodo de tiempo. Es por ello que, en paralelo al desarrollo del proyecto, se ha podido comprobar que, en situaciones excepcionales, garantizar el suministro de energía eléctrica cobra una importancia suprema para el normal funcionamiento de las tareas diarias.

Aquí entran en juego los sistemas de protección que el Sistema Eléctrico de Potencia ha de disponer para poder defenderse y sobreponerse ante las faltas que pueden suceder y garantizar el suministro de electricidad. A continuación, se exponen los mencionados sistemas.

2.1 Sistemas de protección

El sistema eléctrico de potencia ha de ser debidamente protegido para hacer frente a las diversas faltas que acontecen desde que se genera la electricidad hasta que se receptiona en industrias y hogares.

Las principales perturbaciones que tienen lugar en el SEP son las siguientes:

- **Cortocircuito:** Este hecho sucede en circunstancias en las que dos o más conductores de distinta fase conectan directamente entre ellos de forma accidental. Esto implica que la corriente que atraviesa por los conductores del circuito aumenta de forma extraordinaria pudiendo alcanzar valores de hasta cien o mil veces la intensidad nominal. Se han de evitar a toda costa dado que suponen unos efectos desastrosos sobre las máquinas y líneas eléctricas ya que resultan deteriorados fundiendo los conductores y rompiendo las máquinas.
- **Sobrecarga:** Esta circunstancia ocurre en situaciones en las que por el circuito circula una corriente superior a la diseñada. A corto plazo es menos lesivo que el cortocircuito, pero de forma prolongada, la mayor carga circulante provoca calentamientos dentro del sistema que resultan en perforaciones en los equipos aislantes llegando a provocar incluso los citados cortocircuitos.
- **Subtensión:** Este hecho se da en condiciones en las que la demanda del sistema aumenta, véase en horas del día cuando la demanda de los consumidores alcanza su pico, o situaciones en las que un motor muy potente conectado a la red es arrancado.

- **Sobretensión:** A diferencia de la anterior perturbación, ésta supone un aumento de la tensión por encima de la nominal de la red. Implica un riesgo que, entre otros, supone un envejecimiento prematuro de los equipos produciéndose perforaciones de los aislantes o un mayor peligro para los operarios.

Para mantener rigurosamente protegida la red que haga que trabaje en un rango de funcionamiento normal entran en juego los sistemas de protección. Los sistemas de protección son un conjunto de equipos necesarios para detectar y aislar una perturbación en la red. Se encargan de minimizar los efectos procedentes de las diversas faltas tratando de mantener la calidad del suministro.

Todo sistema de protección que se precie incluye todos aquellos componentes que permitan detectar, analizar y despejar la falta:

- **Dispositivos de medición:** Se encargan de medir las variables del sistema tales como tensión e intensidades. Se verá más adelante de la importancia en este trabajo que concierne, de los transformadores de intensidad.
- **Dispositivos de protección:** Son los encargados de discriminar en función del valor de las variables si ha ocurrido una falta y enviar a la unidad de corte la señal de disparo.
- **Interruptores:** Estos dispositivos recibe la orden de disparo y abren los contactos necesarios para aislar el equipo de la falta.
- **Dispositivos de alimentación auxiliar:** Fuentes de alimentación necesarias para alimentar de forma independiente los equipos de protección.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal que persigue este trabajo fin de grado es diseñar y ajustar una protección diferencial. En concreto, se centra en la protección de un transformador de potencia pese a que también se puede implementar en otros equipos como:

- Barras
- Generadores
- Motores
- Líneas de transporte

Se pretende también comprender el funcionamiento de este tipo de protección. Para ello, se incluye una explicación teórica de la misma que desarrolla los puntos clave a tener en cuenta en el diseño de la protección. Bien es cierto, que el fundamento teórico del mismo consta de una simplicidad inicial que podría derivar en subestimar la complejidad de esta protección. Sin embargo, la cantidad de factores a tener en cuenta a la hora de diseñar un equipo como este brindan cierta complejidad al proyecto.

Además de lograr el diseño de la protección, se pretende ponerla a prueba frente a diversas faltas para comprobar su selectividad; debe realizar el disparo y aislar el elemento a proteger únicamente frente a una situación de falta interna, y ser capaz de detectar faltas externas para no disparar dado que ese tipo de faltas no son competencia de la protección de este proyecto.

Con relación al programa de simulación empleado, se pretende mediante la realización de este TFG que el estudiante desarrolle las competencias adquiridas con este instrumento durante ciertas asignaturas del grado. Este proyecto es una muy buena vía para mejorar su nivel de manejo del programa matemático Matlab al enfrentarse desde cero frente a la implementación de un modelo de simulación.

Por todo lo anterior expuesto se puede concluir que el alcance de este trabajo abarca el ámbito del diseño de protecciones de equipos en sistemas eléctricos y, a su vez, el medio en el que se ha desarrollado la simulación es el programa de Matlab Simulink.

4 BENEFICIOS

La implementación de unos sistemas de protección sólidos y fiables como debe ser el de la protección diferencial conduce a una serie de ventajas que abarcan tanto el ámbito económico como el técnico. No cabe ningún tipo de duda que sería impensable la construcción de una estructura eléctrica de potencia desprovista de una debida protección que logre sobreponer cualquier tipo de falta sobre ella que evite o minimice la pérdida del servicio.

Consecuentemente, la primera ventaja que aporta la protección diferencial es una garantía o continuidad de servicio frente a posibles faltas que puede sufrir la red. Traducido a términos económicos, implica un ahorro de daños los cuales son los causantes del aumento de costes que se ven minimizados no sólo en el propio elemento a proteger, sino que también en elementos que pueden sufrir la propagación de las mencionadas faltas.

A efectos técnicos, la mencionada garantía de servicio es sinónimo de seguridad y estabilidad de la red en la que esté operativa la protección. Ello provoca una mayor confianza que repercute en el usuario de la red.

Otra mejora que acarrea esta protección viene ligada a un decremento de la necesidad de equipos de reserva cuya finalidad es entrar en juego en el momento en el que el elemento en activo sufre un determinado fallo. En lugar de proceder a duplicar tanto líneas como elementos sobre ellas con el derivado e impensable coste que ello conlleva, la protección diferencial supone un paso más para lograr una única red segura con una respuesta rápida y fiable frente a fallos que sufren los equipos que protege.

A su vez, el número de equipos disponibles durante una falta es consecuentemente mayor por acción directa del empleo de este tipo de protecciones. Únicamente se desconectan los equipos directamente afectados por el problema en cuestión a nivel local por lo que en otras zonas de la red puede continuar la normalidad del servicio.

En última instancia, en paralelo a los beneficios que aporta directamente esta protección, cabe destacar que el autor de este documento también se ve beneficiado al haber adquirido una serie de conocimientos los cuales durante su etapa en el grado no se exponen de forma tan extensa. Es de mencionar también que este TFG supone un primer paso para el estudiante en la trayectoria profesional como ingeniero.

5 CONTEXTUALIZACIÓN TEÓRICA

En esta sección del trabajo se detallan los conceptos teóricos básicos en los que se apoya la simulación de la protección diferencial del transformador.

5.1 La protección diferencial

El sistema de protección que se emplea en este trabajo es el llamado *función de protección diferencial* al que le corresponde el número 87 dentro de los códigos ANSI. Se fundamenta en la primera ley de Kirchhoff: La suma instantánea de las corrientes que concurren en un nudo ha de ser cero.

La protección diferencial se encarga de comparar las corrientes de entrada y de salida de cada fase del elemento protegido, en este caso, de un transformador de potencia. En consecuencia, la protección se activa cuando la diferencia entre la corriente entrante al elemento a controlar y la saliente excede un valor determinado. Así, si la diferencia entre ellas se sitúa dentro del rango no se envía la orden de disparo. Para una situación en la que dicha diferencia sobrepase un valor crítico, sí se enviaría la orden de disparo y se sospecharía que hubiese ocurrido una falta interna.

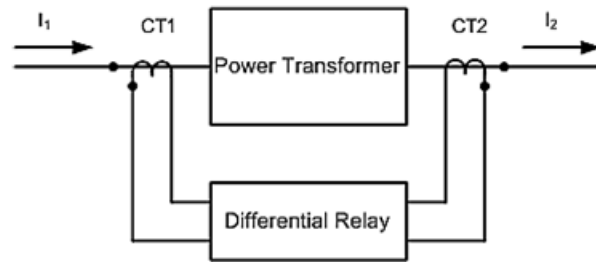


Figura 1 Protección diferencial de transformador

En la figura 1 se observa la conexión de la protección a un transformador monofásico. En el caso de un transformador trifásico, cada fase sería tratada de forma individual.

Tanto a la entrada como a la salida del elemento a proteger se sitúa un transformador de intensidad. Este tipo de elementos se tratan de transformadores de protección. Su finalidad es adaptar el valor de la intensidad del secundario a un valor normalizado que suele ser de 1 ó 5 Amperios.

Se definen dos corrientes a destacar en este sistema:

- Corriente de paso: Es la semisuma escalar de las corrientes entrantes y salientes al elemento a proteger. Se denomina también corriente de frenado.

$$I_{paso} = \frac{|I_1| + |I_2|}{2}$$

- Corriente diferencial: Es el valor absoluto de la suma fasorial de las corrientes entrantes y salientes.

$$I_{diferencial} = |I_1 + I_2|$$

Ante una falta externa, la intensidad que atraviesa el transformador por ambos lados del mismo, I_1 e I_2 , es la misma. Lo mismo sucede con las intensidades del secundario de los TI, I'_1 e I'_2 , por lo tanto, la intensidad diferencial adquiere un valor nulo y la protección no actúa.

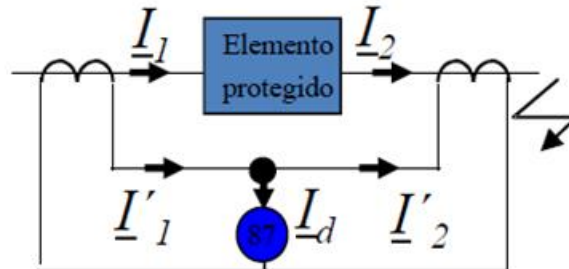


Figura 2 Funcionamiento de la protección diferencial ante falta externa.

Ante una falta interna en la máquina a proteger, las corrientes entrantes y salientes a la máquina son diferentes, luego al atravesar el circuito de los TI también son dispares. Esa diferencia es la que atraviesa la rama diferencial, surgiendo una intensidad diferencial que da la luz de alarma y envía la señal a la unidad de disparo para que actúe y aisle el circuito del transformador.

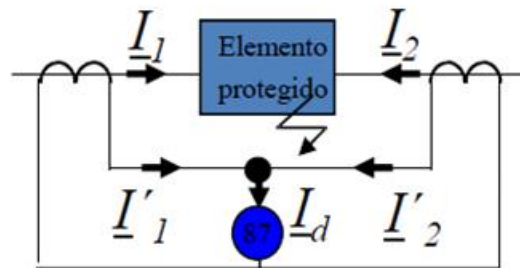


Figura 3 Funcionamiento de la protección diferencial ante falta interna.

Esta protección está dotada pues de un comportamiento completamente selectivo. Su objetivo se fundamenta en proteger todo elemento situado en los dos TIs y no responder ante fallos ocurridos fuera de los mismos.

5.1.1 Factores que afectan a la protección diferencial

Idealmente, la protección diferencial no entrañaría excesiva dificultad de aplicación si bajo una situación de trabajo normal del transformador, sin ningún tipo de falta, las intensidades entrantes y salientes al mismo fuesen iguales. En la realidad, esto no sucede consecuencia de una serie de factores que se exponen a continuación.

5.1.1.1 La corriente de magnetización

Al efectuar la energización de un transformador de potencia en vacío surge una corriente por el circuito primario del mismo. Por el bobinado secundario no circula corriente alguna dado que se encuentra en circuito abierto. Esta corriente de primario es la llamada intensidad de vacío, i_{10} , la cual no es sinusoidal debido al ciclo de histéresis.

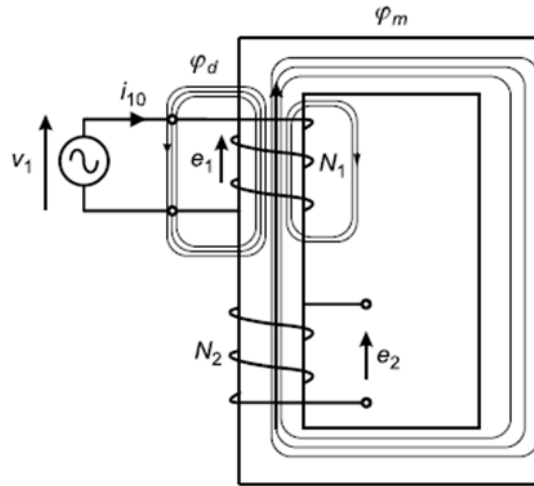


Figura 4 Energización de transformador monofásico en vacío.

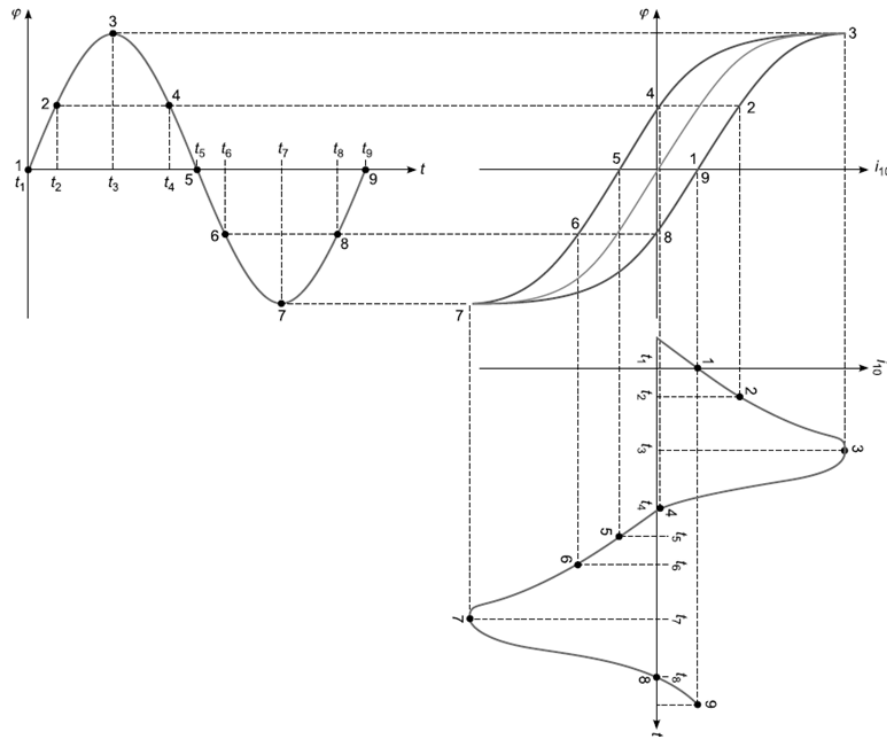


Figura 5 Intensidad de vacío real.

La representación vectorial de esta intensidad de vacío real se hace sustituyéndola por una sinusoidal equivalente constituida por dos componentes:

- La intensidad de pérdidas: Se le atribuyen las pérdidas en el hierro.
- La intensidad magnetizante: Es la intensidad encargada de producir flujo por las bobinas del transformador.

Ambas se tratan de corrientes diferenciales puras siendo de mayor proporción la magnetizante, puesto que son corrientes que entran al elemento a proteger y que no salen del mismo, se quedan por la rama de vacío del transformador.

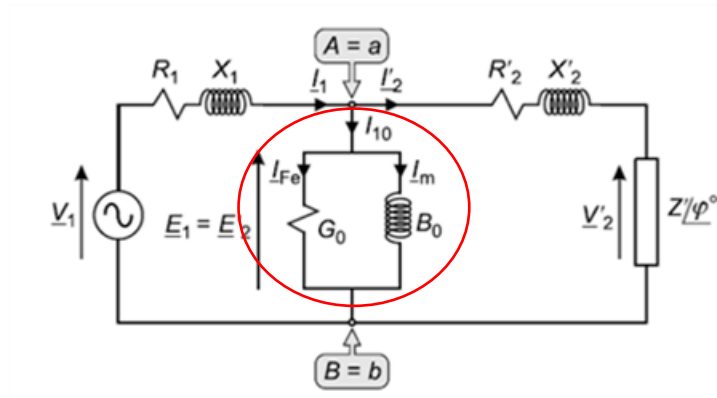


Figura 6 Rama de vacío del transformador

Durante la conexión del transformador pueden alcanzar valores altísimos del orden de 80 veces la intensidad nominal de la máquina para los transformadores de gran potencia. Tras el conexionado su valor alcanza en torno al 2 ó 3% de la intensidad nominal de la máquina.

El valor mencionado del 2 o 3% de la intensidad nominal provoca que la protección interprete dicho valor como intensidad diferencial y opere en falso. Para hacer frente a esta circunstancia se ajusta el valor de operación del relé por encima con lo que se consigue evitar disparos indebidos.

5.1.1.2 Niveles de tensión e intensidad desiguales en el transformador de potencia

Todo transformador de potencia basa su forma de funcionamiento en la adaptación de los niveles de tensión de las diferentes zonas del Sistema Eléctrico de Potencia:

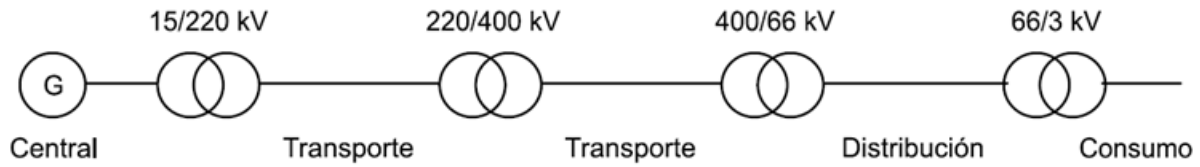


Figura 7 Sistema Eléctrico de Potencia.

La relación establecida entre la tensión e intensidades del primario y del secundario del transformador viene impuesta por la relación de transformación RT:

$$RT = K \frac{N_1}{N_2}$$

Donde N_1 y N_2 son el número de espiras del bobinado primario y secundario y K es un factor multiplicador el cual depende del tipo de conexión del bobinado primario y secundario.

La relación entre la tensión e intensidad de ambos lados del transformador es inversa, esto es, si el transformador es elevador, la tensión del primario es inferior a la del secundario mientras que la intensidad primaria es superior a la secundaria:

$$\frac{V_{1N}}{V_{2N}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}}$$

Este hecho introduce una complicación más en el trabajo de la protección diferencial. El perfecto funcionamiento de la protección se ve afectado debido a que, a la hora de comparar las intensidades entrantes y salientes al elemento a proteger, éstas sí o sí tienen una disparidad considerable, fruto de la RT, ergo la protección procedería a disparar para todas las situaciones de funcionamiento posibles.

Tal circunstancia nos lleva a introducir el concepto de reducir las intensidades a valores por unidad. En lugar de comparar los valores numéricos de dichas intensidades se hace un cambio de escala para referir los valores de intensidad a unos de referencia que serán las intensidades nominales de cada lado del transformador. Así, se pasa de trabajar con valores absolutos a referirlos al nivel de carga de cada línea de cada fase de la máquina.

$$i_1 = \frac{I_1}{I_{1N}}$$

$$i_2 = \frac{I_2}{I_{2N}}$$

5.1.1.3 Desfase entre intensidades de primario y secundario e intensidad homopolar.

Para poder comparar las intensidades del bobinado primario y secundario de forma correcta es indispensable que ambas se encuentren en fase. En caso contrario, la medición estaría mal realizada. El hecho de que se encuentren en fase o no radica en la conexión de las bobinas del primario y del secundario, esto es, en el índice horario del transformador.

Adicionalmente, en función del tipo de conexión existente entre las tres fases de las bobinas de la máquina, puede ocurrir que en caso de falta externa a tierra circule intensidad homopolar por uno de los devanados mientras que por los devanados del otro lado del transformador no circula corriente homopolar alguna.

Este hecho puntual se da en la conexión en estrella del transformador ya que al encontrarse la estrella conectada a tierra directamente a través del neutro la intensidad homopolar circula libremente por las tres fases del mismo. Para el caso del triángulo no ocurre.

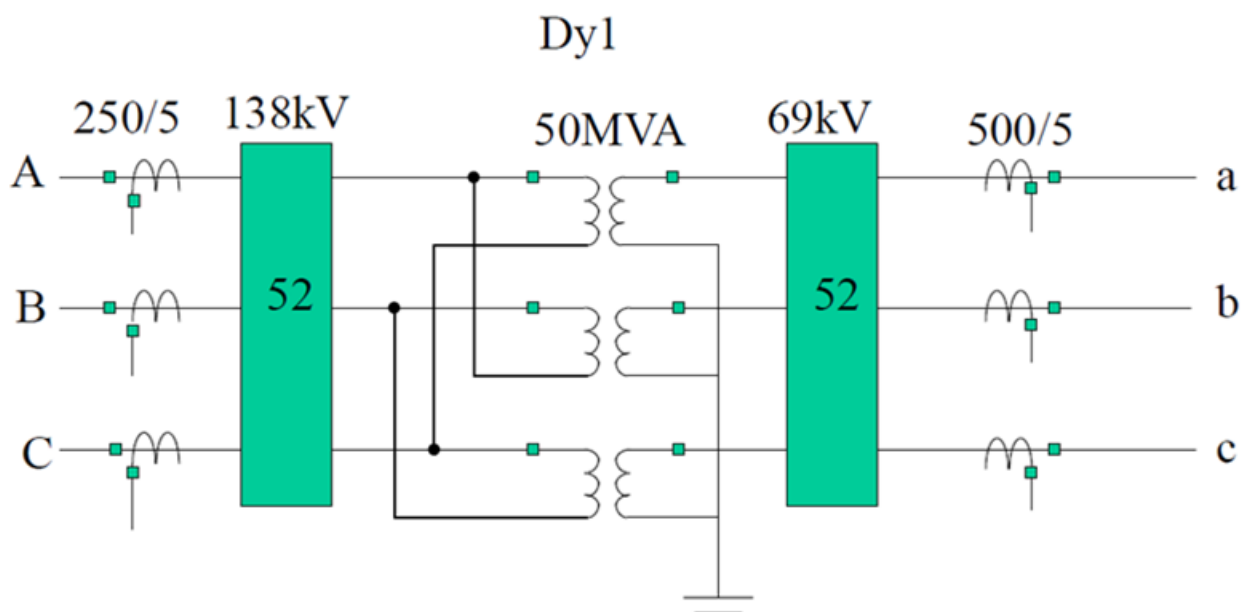


Figura 8 Ejemplo de conexión de transformador

La circulación de corriente homopolar a través de únicamente un lado del transformador conduce a errores en la medición de intensidad diferencial puesto que los transformadores de intensidad del lado conectado en estrella del transformador medirán dicha homopolar mientras que los TIs del lado del triángulo no. Esta disparidad en la medición de intensidades provoca inevitablemente intensidad diferencial dando lugar a la apertura del circuito de forma indeseada.

Con el fin de evitar que esto ocurra surgen dos formas para solucionarlo.

En primer lugar, existe un método el cual es el que se empleaba antiguamente denominado *método de phasing*. Este método consiste en conectar los TI del lado de la estrella del transformador en triángulo y los del lado del triángulo en estrella. De esta manera, se consigue poner en fase las intensidades además de eliminar la contribución de la intensidad homopolar.

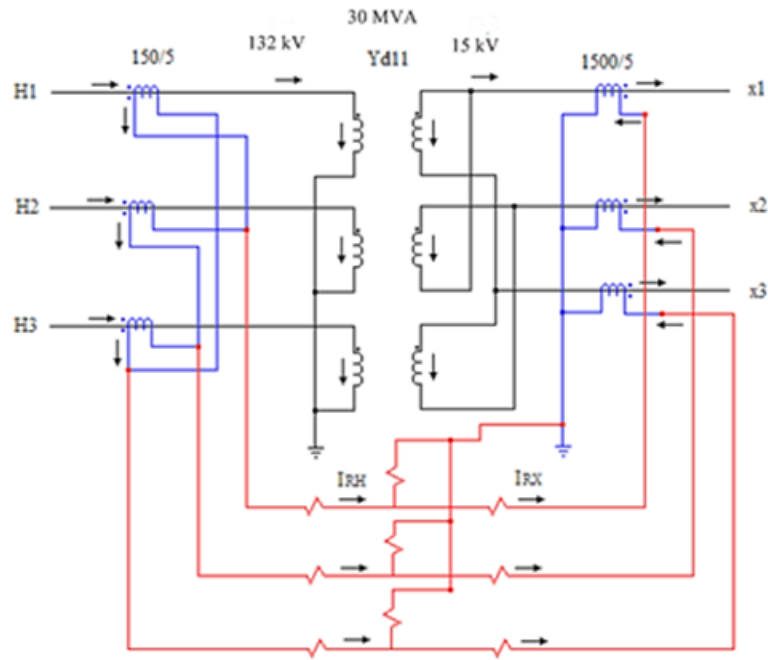


Figura 9 Método de Phasing

La resta de las intensidades de dos fases se encuentra exenta de corriente homopolar puesto que independientemente de la fase a tratar, la homopolar es la misma. De manera que únicamente se comparan las secuencias positivas y negativas de las intensidades. De esta manera, se resuelve la irrupción de la intensidad homopolar en la medición

Actualmente, la compensación del código horario se realiza a través de la aplicación de diferentes matrices que consiguen poner en fase las intensidades. El procedimiento es el siguiente:

Se ha de colocar un devanado de referencia para poder construir con las intensidades del devanado que queda libre las intensidades del devanado escogido como referencia. Esto se hace mediante operaciones de suma y resta de vectores. Al devanado asignado como referencia se le asigna el código horario 0.

Se dan dos casos claramente diferenciados. Uno consiste en tomar como referencia el bobinado conectado en triángulo. Esta opción resulta la más fácil de llevar a cabo debido a que en la conexión en triángulo no se toma en cuenta la contribución de la intensidad homopolar a la intensidad que circula por cada una de las fases del bobinado debido a que la intensidad homopolar circula únicamente entre las fases. De esta manera, la matriz a emplear es:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

Por otro lado, si se considera como referencia el bobinado conexionado en estrella se ha de ser más cuidadoso. Bajo esta situación, las tres fases del bobinado se encuentran conectadas a tierra a través del neutro por ello la intensidad homopolar circula libremente por las fases conduciendo a la protección a error ya que la homopolar es intensidad diferencial pura. Así pues, se emplea un filtro homopolar que consiste en restar la intensidad homopolar a cada una de las fases para eliminar su contribución.

La intensidad homopolar se define como:

$$I_0 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

Restando la intensidad homopolar queda:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

Con la intención de aclarar esta explicación, se añade el ejemplo del transformador utilizado para la simulación. Dicho transformador de potencia se trata de un D1y_n en el sistema americano, o lo que es lo mismo en el europeo, un Dy_n11.

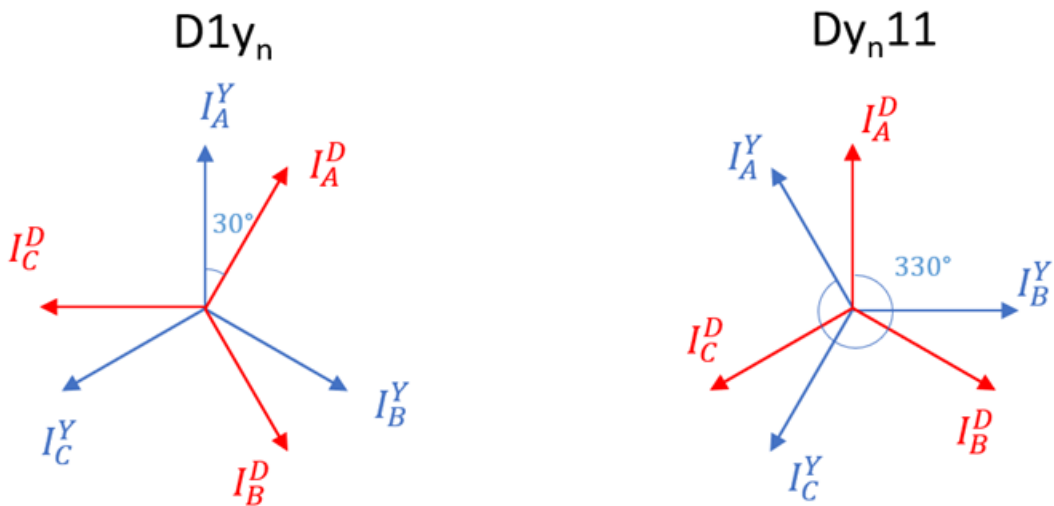


Figura 10 Equivalencia de notaciones

Prosiguiendo con la notación europea, esto es, Dy_n11, si se toma como referencia el bobinado en triángulo, la matriz que se obtiene naturalmente, es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

Para poder construir con las intensidades de la estrella, las del triángulo, se procede a efectuar operaciones de suma y resta de vectores:

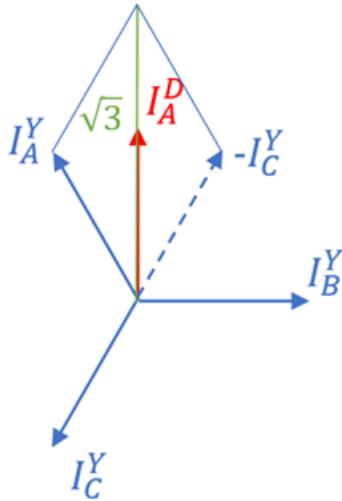


Figura 11 Fase A

Para la fase A resulta:

$$I_A^D = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A^Y \\ I_B^Y \\ I_C^Y \end{bmatrix}$$

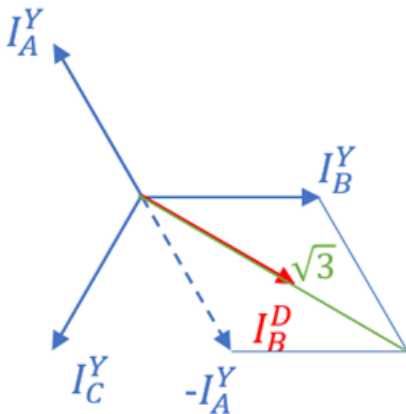


Figura 12 Fase B

Para la fase B:

$$I_B^D = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A^Y \\ I_B^Y \\ I_C^Y \end{bmatrix}$$

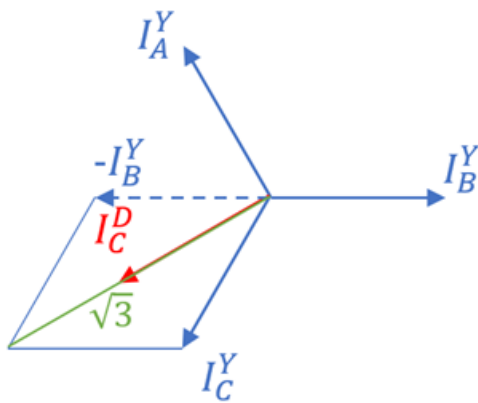


Figura 13 Fase C

Y para la fase C:

$$I_C^D = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A^Y \\ I_B^Y \\ I_C^Y \end{bmatrix}$$

Resultando una matriz para la estrella:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A^Y \\ I_B^Y \\ I_C^Y \end{bmatrix}$$

Nótese que, en este caso, para generar la matriz de la estrella no precisa aplicar el filtro homopolar puesto que para construir cada fase del triángulo a partir de las fases de la estrella se han restado 2 fases de la misma por lo que la contribución de homopolar se anula.

5.1.1.4 TAPs de regulación de tensión

La relación de transformación de un transformador depende directamente del número de espiras, así como del tipo de conexión en el caso de los trifásicos. La implementación de la regulación de tensión tiene como finalidad adaptar la RT de la máquina para poder adecuar el transformador a la red. Dicha adaptación se puede efectuar modificando el devanado primario, secundario o ambos. A efectos prácticos se suele realizar sobre el bobinado secundario únicamente.

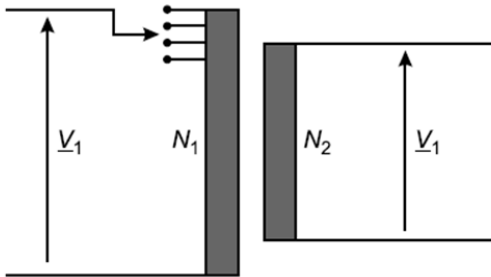


Ilustración 10 Regulación de tensión sobre primario

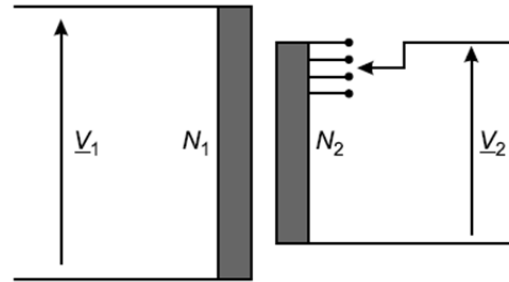


Ilustración 11 Regulación de tensión sobre secundario

Este mecanismo suma versatilidad al transformador dotándole de una capacidad de hacer frente a variaciones en la red a la que está acoplado. Asimismo, responde ante variaciones en el nivel de carga conectada en el bobinado secundario a fin de mantener la tensión de salida invariable a alteraciones de carga conectada.

Esto suma otra dificultad más a la protección diferencial dado que al modificar la RT de manera continua el valor de la relación de intensidades también se ve modificada introduciendo un consiguiente error y el valor programado para que salte la protección quedaría obsoleto.

5.1.2 Curva de disparo típica de una protección diferencial

Teniendo en consideración los diferentes errores mencionados previamente se define la curva de disparo típica de la protección diferencial.

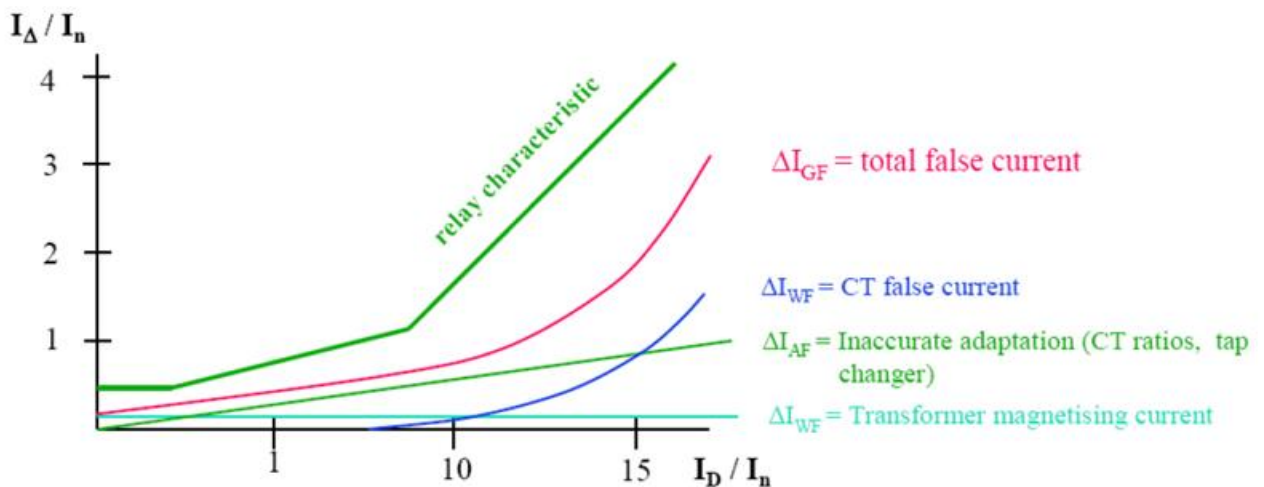


Figura 14 Curva de disparo de la protección

En la gráfica queda representada la corriente de paso I_{paso} (abscisas) frente a la corriente diferencial $I_{\text{diferencial}}$ (ordenadas), ambas en valores por unidad.

La protección equivale a la línea de color verde que deja bajo ella la suma de los tres errores de forma que la intensidad falsa que aparezca no haga saltar a la protección diferencial. Los tres errores son:

- La intensidad magnetizante queda representada por la recta horizontal cercana al cero. Se trata de una pequeña intensidad diferencial que surge desde el mismo momento de conexión de la máquina y que la característica del relé ha de estar por encima de ella para evitar actuar.
- Los TAPs de regulación de tensión son los encargados de producir el siguiente de los errores a solventar. Éstos introducen un error proporcional a la intensidad que se encuentra circulando por el circuito. A mayor intensidad circulante, mayor intensidad diferencial ocasiona pudiéndose determinar que la pendiente de la recta viene íntimamente relacionada con el regulador de tensión.
- El tercero de los errores, el cual se considera como el más importante de todos, viene representado por la curva ascendente de color azul. Dicho error viene ligado a la inexactitud que aportan los transformadores de intensidad a medida que la intensidad de paso aumenta. Para valores pequeños de la corriente diferencial, de en torno a dos o tres veces la intensidad nominal, el error resulta prácticamente despreciable. Sin embargo, de tres o cuatro veces en adelante, aparece el conocido efecto de la saturación de los transformadores. Este efecto provoca que el error abandone el comportamiento lineal disparándose rápidamente hacia arriba.

Los tres errores quedan aunados en la curva de color rojo que se puede contemplar en la figura 14. La protección ha de tener una característica tal que deje por debajo de ella la suma de los tres errores con el fin de impedir que toda la intensidad falsa que aparezca haga saltar a la protección.

Esta curva divide el plano en dos zonas:

- Zona de operación o de disparo: Área superior a la curva de la protección.
- Zona de no operación o de no disparo: Área inferior a la curva de la protección

En cada instante se realiza la medición de la intensidad de paso e intensidad diferencial que circula por el circuito de los transformadores de intensidad. Esto da lugar a un punto en el plano que puede hacer actuar a la protección o no.

5.1.3 Discriminación por armónicos

Adicionalmente a los problemas mencionados en el punto 5.1.1, se han de tener en consideración dos escenarios posibles que surgen durante el transcurso del funcionamiento normal del transformador. Uno de ellos se trata del conexionado de la máquina a la red, situación en la que aparece una conexión diferencial brutal que daría pie a la protección a actuar. La segunda coyuntura se manifiesta al sobreexcitar la máquina, esto es, al recibir una tensión mayor que la nominal propia, cosa que acontece debido a un fallo externo a la misma y, por ello, la protección diferencial no debería de actuar.

Tanto la conexión como la sobreexcitación del transformador no suponen una falta interna, con lo cual, se ha de discriminar estas 2 situaciones frente a las faltas. Esta discriminación se lleva a cabo a través de un análisis de los armónicos contenidos en las ondas. Se prosigue pues a analizar los tipos de ondas.

5.1.3.1 Ondas de falta interna

Cuando ocurre una falta interna en un transformador la onda de falta adquiere un comportamiento sinusoidal atribuible a la parte alterna de la corriente junto con una parte continua que dota a la onda de un comportamiento de exponencial decreciente.

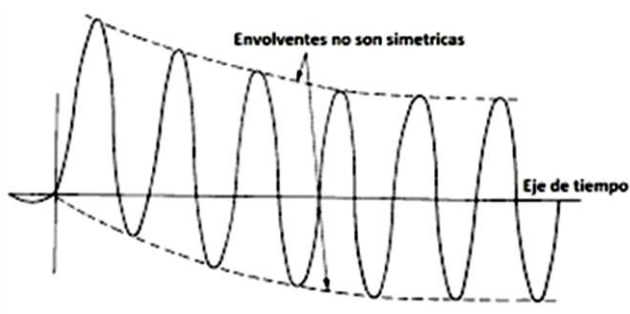


Figura 16 Onda de cortocircuito típica

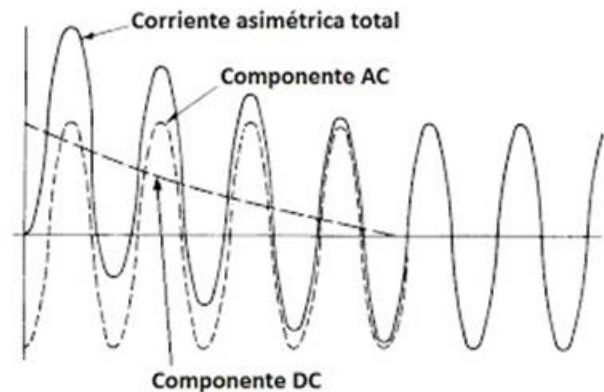


Figura 15 Onda de cortocircuito descompuesta

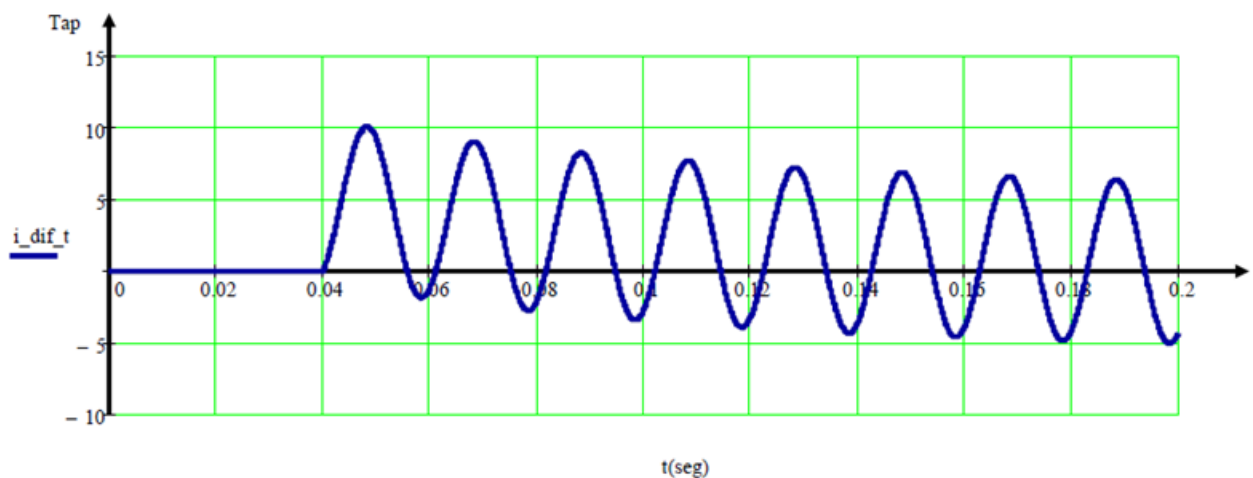


Figura 17 Onda de intensidad diferencial tras un cortocircuito

Hágase hincapié que la onda de intensidad diferencial se ha medido en TAPs, que son las intensidades nominales de los TIs referidas al secundario en p.u.

Tras aplicar el análisis de Fourier a la onda de cortocircuito se determina que la onda no tiene ni segundo ni quinto armónico.

El armónico fundamental toma un valor cercano a 6 veces el TAP durante en transcurso de la falta. La protección debe actuar porque se fija para que actúe ante valores superiores de 0.2 veces el TAP.

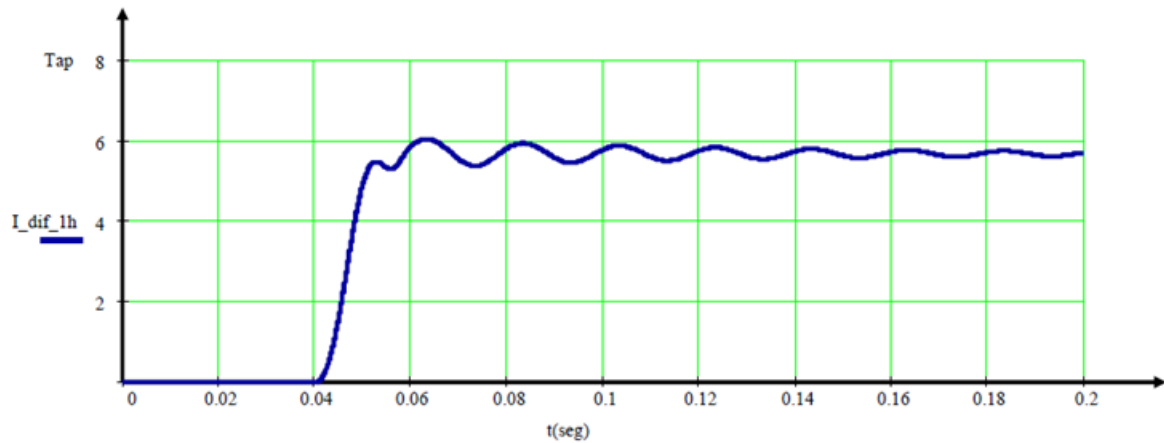


Figura 18 Armónico fundamental de la intensidad diferencial

Si se observa el segundo armónico de la onda de cortocircuito se comprueba como, al cabo de menos de un periodo de la onda (20 ms), la contribución de segundo armónico desaparece.

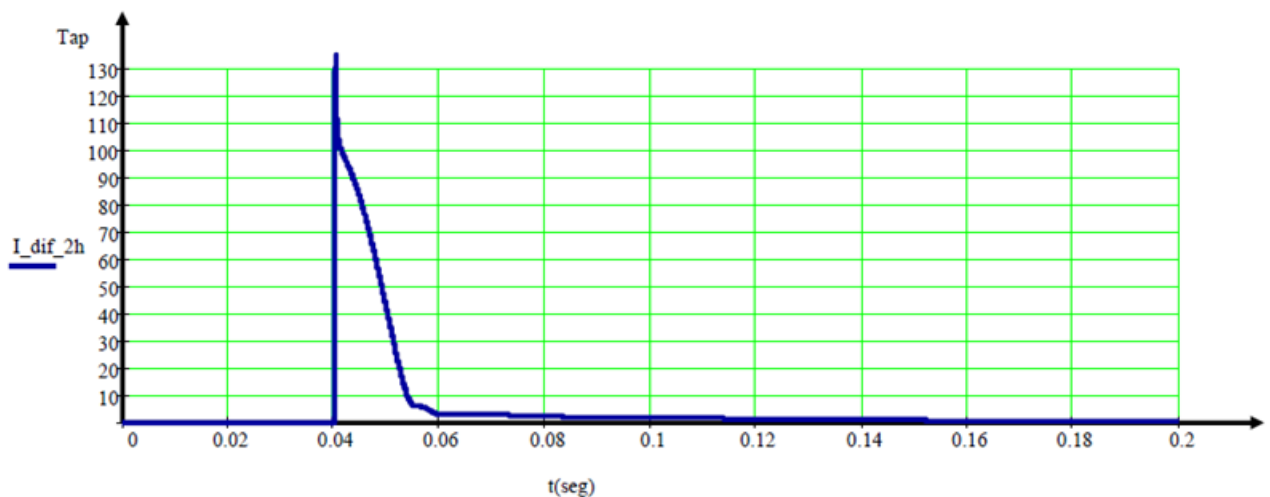


Figura 19 Segundo armónico de la intensidad diferencial

Lo mismo sucede para el quinto armónico de la onda. Prácticamente en medio ciclo su aportación es mínima.

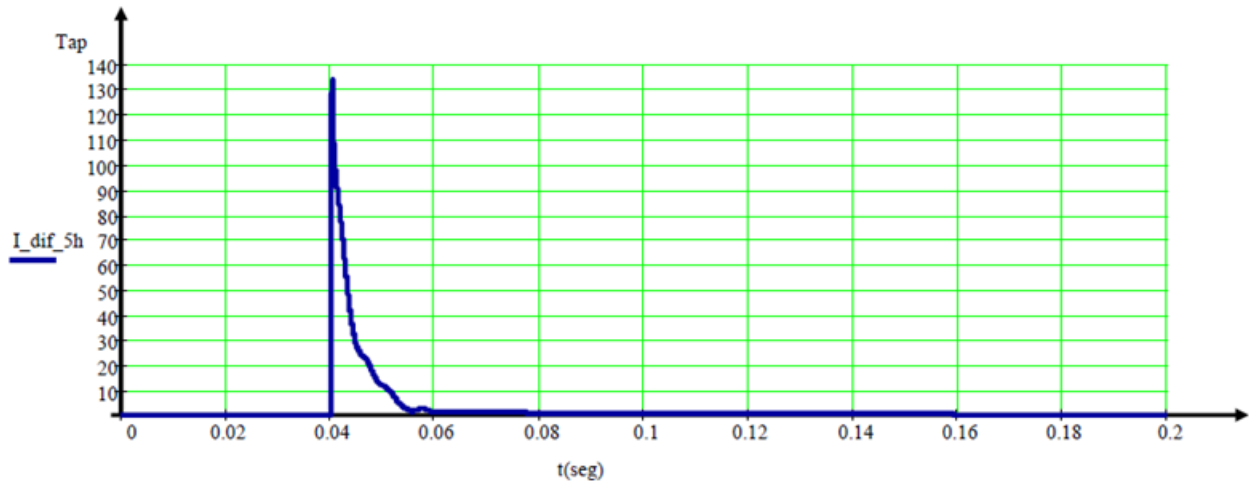


Figura 20 Quinto armónico de la intensidad diferencial

Como conclusión, se puede deducir que la onda de cortocircuito se trata de una onda con un carácter limpio en relación a la ausencia de segundo y quinto armónico. Esta caracterización es clave para poder discernir la causa de la onda a tratar.

5.1.3.2 Ondas de sobreexcitación

En circunstancias en las que a un transformador se le aplica una tensión superior a la nominal propia o la frecuencia de la red a la que está conectado disminuye, el flujo magnético aumenta, y junto a él, la tensión interna de la máquina, E_0 , de acuerdo a la ecuación:

$$E_0 = 4.44 N \Phi f$$

Para poder efectuar el aumento de la tensión interna E_0 , la intensidad de excitación tiene que hacer lo propio.

Los transformadores están diseñados para trabajar en el codo de saturación:

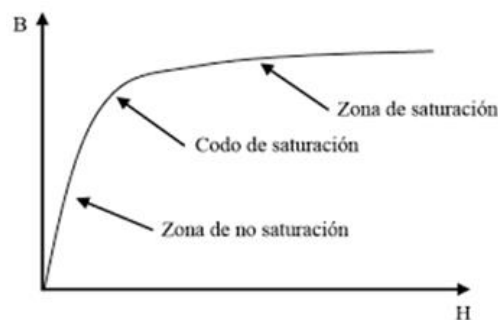


Figura 21 Curva de primera imantación

La sobreexcitación del transformador tiene lugar en situaciones de falta externa en unas de las fases de la máquina. En la propia fase de falta la tensión disminuye, pero la tensión en las fases sanas aumenta, pudiendo provocar la saturación del núcleo del transformador aumentando la intensidad magnetizante en varios órdenes de magnitud.

El aumento de la tensión provoca que el transformador pase a trabajar en la zona de saturación. Esto implica que, a pequeñas variaciones en la tensión, la intensidad magnetizante aumente de una forma considerable. La protección diferencial interpretaría esta intensidad magnetizante como intensidad diferencial pura dando pie a disparar y desconectando el transformador de la red, luego se interrumpiría el suministro de electricidad a las líneas que la máquina estuviese alimentando.

Con el objetivo de evitar que la protección actúe ante situaciones de sobreexcitación se procede a analizar la intensidad de magnetización bajo una situación en la que se le alimenta a 1.5 veces la tensión nominal del primario.

La intensidad diferencial que tiene lugar al aplicar 1.5 veces la tensión nominal adquiere esta forma tan característica, con un valor de pico de en torno a 0.7 veces el TAP.

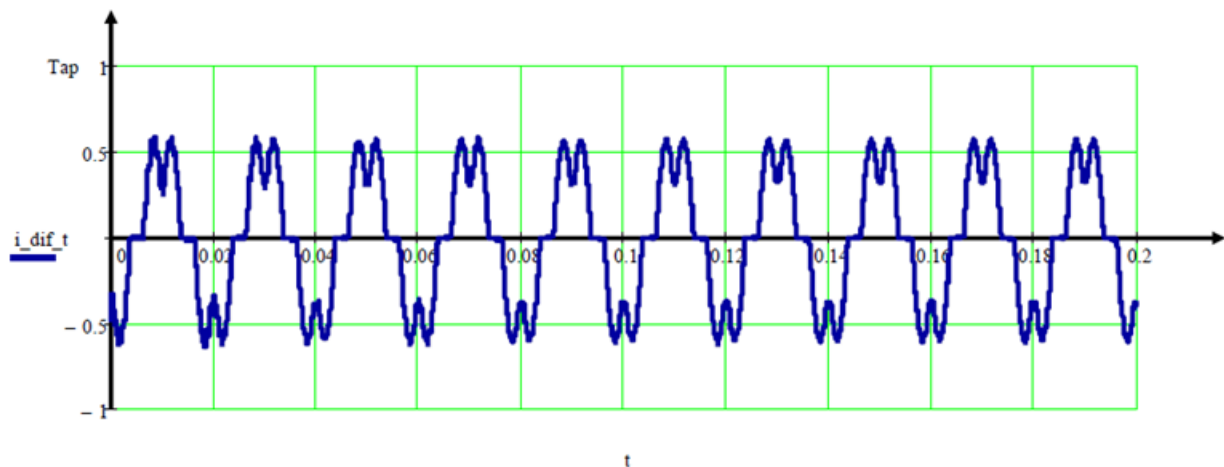


Figura 22 Intensidad diferencial medida en TAPs

A medida que la onda de tensión asciende, la intensidad magnetizante sube de acuerdo a ella, hasta que llega un momento en el que la intensidad que recibe es tan alta que produce la caída de tensión en la línea. Esto provoca que la intensidad magnetizante baje también. A continuación, la tensión se recupera al igual que la intensidad magnetizante para bajar de nuevo, esta vez a cero, debido a la caída de tensión en la línea al igual que antes. Ya en cero, la intensidad diferencial se mantiene en cero debido a que el transformador, se encuentra trabajando antes de llegar al codo de saturación, zona en la que la intensidad de magnetización se mantiene baja, de un valor de en torno al 2% de la intensidad nominal. Como se comprueba en la figura 22, pasado el codo la intensidad se dispara.

Bajo estas circunstancias la protección no debe operar dado que la falta se ha producido fuera del transformador; la sobretensión en la máquina se produce debido a un agente externo como es la falta.

Llevando a cabo el análisis de Fourier de la onda de intensidad magnetizante se sacan una serie de conclusiones.

En la siguiente figura se muestra el primer armónico, esto es, la componente de 50 Hz. En ella se puede apreciar que tiene un valor de aproximadamente 0.5 veces el TAP. La protección se ajusta típicamente a 0.3 veces la intensidad nominal del secundario, por lo tanto, bajo esta situación la protección se vería obligada a disparar, hecho el cual se pretende impedir.

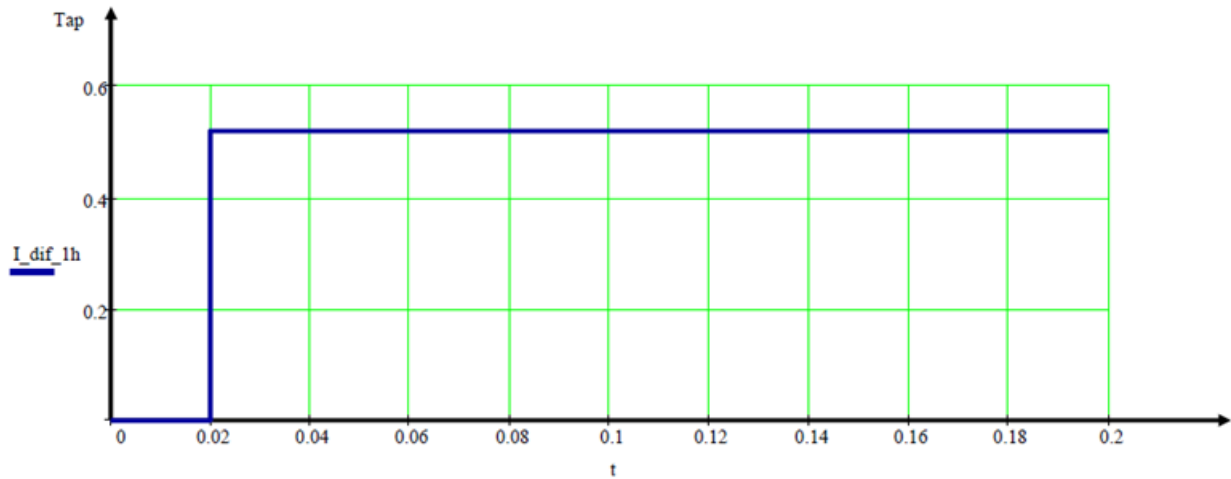


Figura 23 Armónico fundamental

Prosiguiendo el análisis por Fourier se procede ahora a analizar el segundo armónico de la onda.

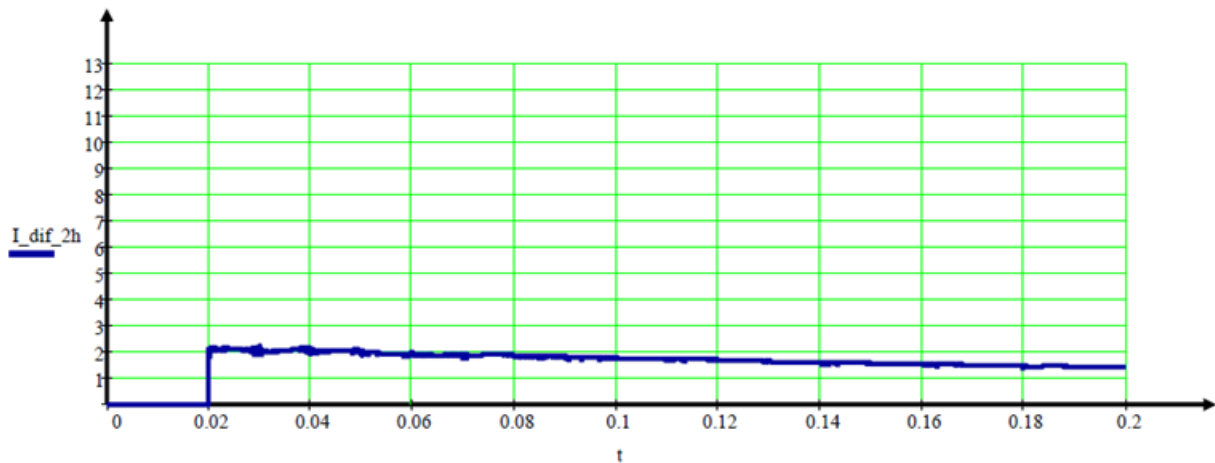


Figura 24 Segundo armónico

Tras inspeccionar la componente de segundo armónico se ve como su valor es de un 2% aproximadamente. Por lo que se deduce que apenas tiene distinción respecto al segundo armónico de la onda de cortocircuito. Por consiguiente, el segundo armónico no es una razón de peso para diferenciar el fenómeno de la sobreexcitación frente a una falta interna.

Se muestra a continuación la componente de quinto armónico de la onda de intensidad magnetizante.

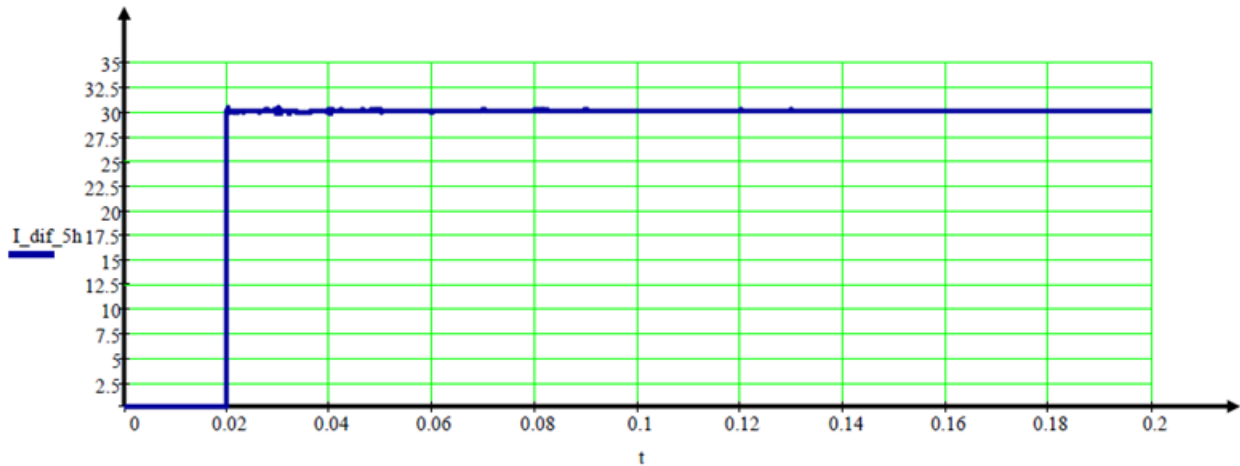


Figura 25 Quinto armónico

El quinto armónico adquiere un valor del 30% del TAP. A diferencia de una falta interna donde el porcentaje de quinto armónico cae estrepitosamente en apenas medio ciclo, en este caso particular de transformador sobreexcitado, el quinto armónico permanece en el tiempo. Por lo tanto, la detección de un alto valor de quinto armónico sí implica una razón de peso para proceder al bloqueo de la unidad de disparo. Valores superiores al 25% del TAP serán tratados como sobretensión

5.1.3.3 Ondas de conexión

Al conectar un transformador a la red surge una intensidad de conexión la cual es corriente magnetizante de alto valor. Dicha corriente es una corriente diferencial pura con un valor de pico muy superior a la nominal.

La corriente de conexión, también denominada corriente *Inrush*, depende del instante en el que el transformador se conecte a la red. Se plantean dos escenarios posibles; el primero es el momento de conexión del transformador a la red y el segundo es el funcionamiento normal de la máquina.

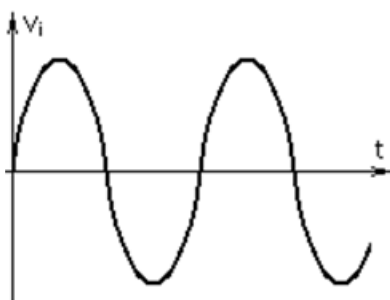


Figura 26 Onda de tensión

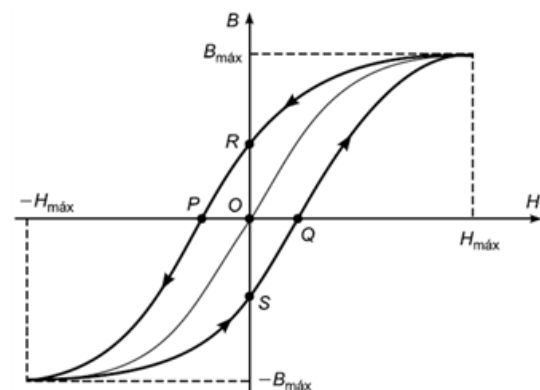


Figura 27 Ciclo de Histéresis

En funcionamiento normal, el cero de la tensión se corresponde con el mínimo del flujo. Por consiguiente, el flujo va de cero a dos veces el flujo máximo. En todo momento el transformador se

encuentra trabajando por debajo de la saturación y por tanto la corriente de magnetización se mantiene en torno al 2% de la intensidad nominal de la máquina.

Sin embargo, durante la conexión del transformador a la red, en el instante de paso por cero de la tensión, el flujo se encuentra también en el paso por cero. De forma que el pico de la tensión se corresponde con el codo de saturación del transformador.

El flujo magnético se corresponde con el área bajo la línea de la onda de tensión de acuerdo a la expresión:

$$\Phi = \int v(t) dt$$

Con lo cual, tras pasar la tensión por el máximo y continuar hasta llegar al siguiente paso por cero, el flujo continúa subiendo tras pasar el codo de saturación y alcanza un valor que duplica al flujo máximo. Después disminuye hasta llegar al cero de nuevo y vuelve a subir hasta dos veces el flujo máximo y así sucesivamente. Este aumento descontrolado del flujo viene de la mano del aumento de la intensidad de magnetización.

En la siguiente figura se puede observar el comportamiento que toma el flujo magnético durante la conexión del transformador.

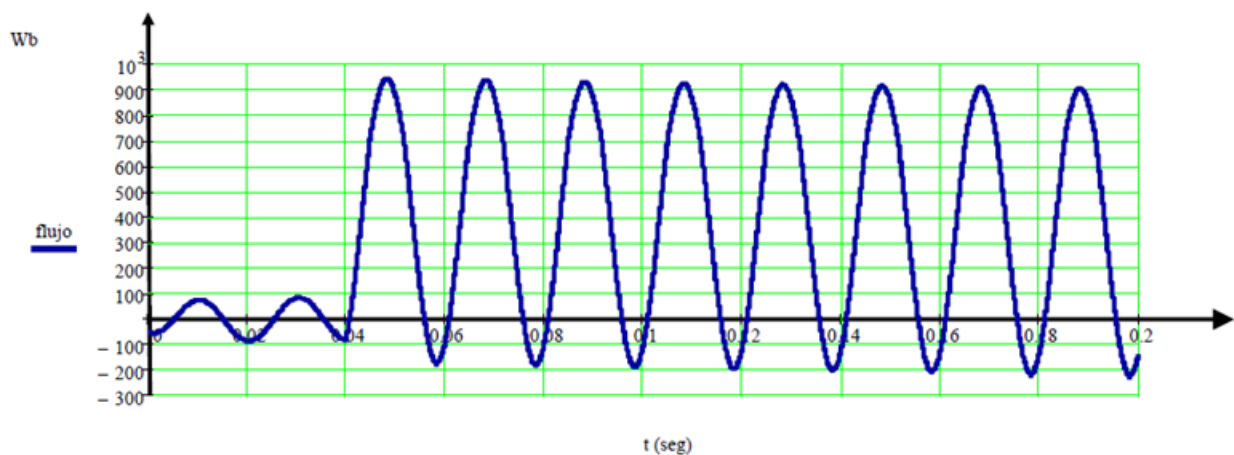


Figura 28 Flujo magnético durante la conexión del transformador

El flujo es totalmente asimétrico puesto que como se ha explicado en el párrafo anterior, va desde cero a 2 veces el flujo máximo que se produce en el codo. Debido a la resistencia interna del bobinado, a medida que va pasando el tiempo se va amortiguando el efecto, llegando a tardar del orden de minutos la estabilización del flujo.

El efecto que causa este flujo sobre la intensidad magnetizante se muestra en la siguiente figura.

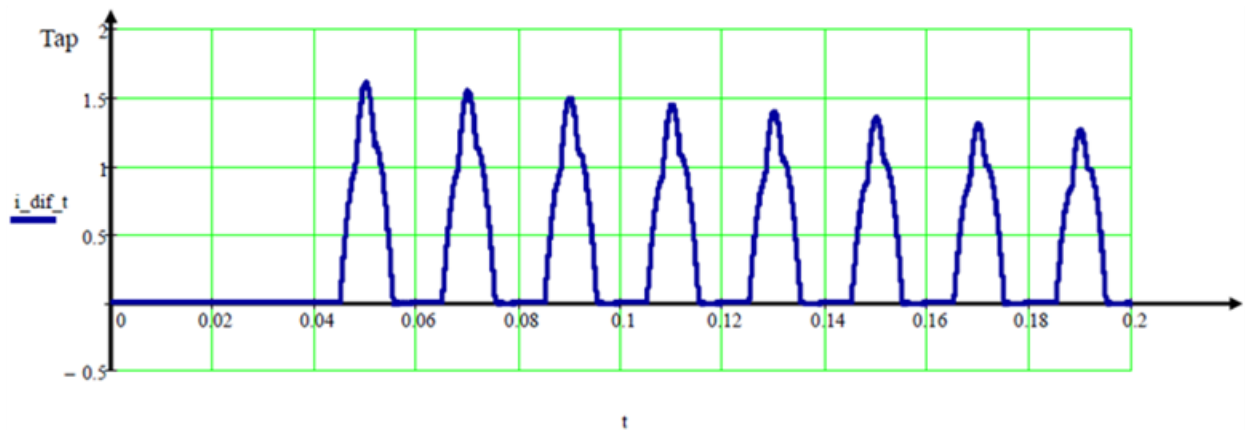


Figura 29 Intensidad diferencial de la onda de corriente de conexión

Se observa como en un primer tramo la intensidad magnetizante es de en torno a un 2% de la intensidad nominal. Esto es debido a que el transformador se encuentra trabajando por debajo del codo de saturación. Una vez pasado el codo, la intensidad de magnetización se dispara hasta alcanzar un valor del doble de la corriente nominal y descende nuevamente para repetir el proceso. Este efecto de acuerdo transcurre el tiempo se va mitigando fruto de las resistencias internas de las bobinas hasta lograr el funcionamiento normal de la máquina estableciéndose la intensidad en un valor de 0.02 veces el TAP.

Realizando el analisis de Fourier de la onda de corriente se inspecciona en primer lugar el primer armónico:

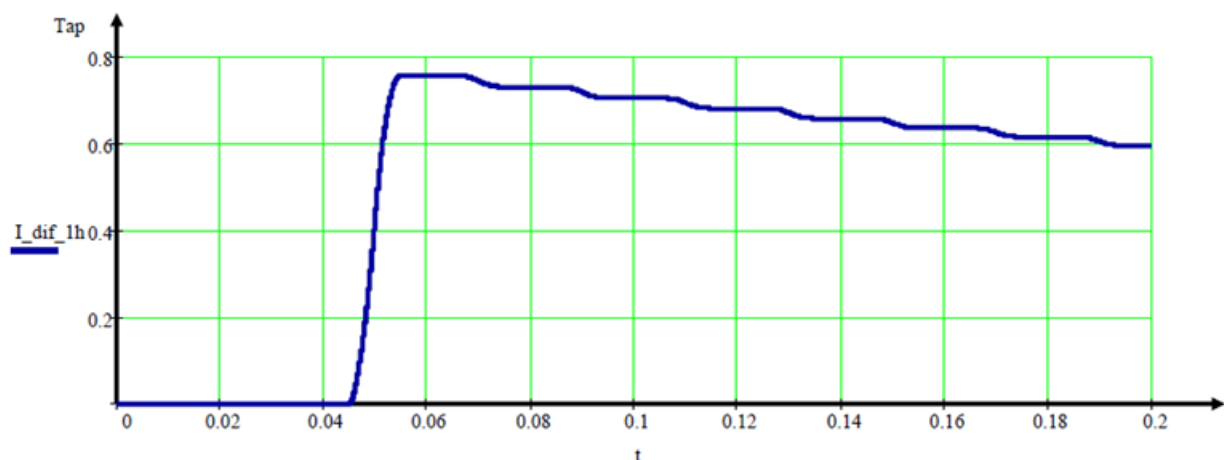


Figura 30 Armónico fundamental

Al visionar la gráfica se comprueba que el armónico fundamental alcanza un valor de en torno a 0.8 veces el TAP. La protección se ajusta para que dispare ante valores de intensidad diferencial por encima de 0.3 veces el TAP, ergo en esta situación, efectua el disparo. Este hecho ha de evitarse por lo que se han de inspeccionar otros armónicos en los que se descompone la onda.



32

5.1.4 Protección diferencial de tierra restringida

El transformador de potencia que se protege con la protección diferencial no queda protegido ante una falta proveniente junto a la intensidad homopolar ya que la intensidad homopolar se ha eliminado mediante la resta de dos fases en el lado de la estrella del transformador para poder compararla directamente con el lado del triángulo.

Se emplea una protección completaría denominada *de tierra restringida* con el fin de proteger a la máquina en esas situaciones.

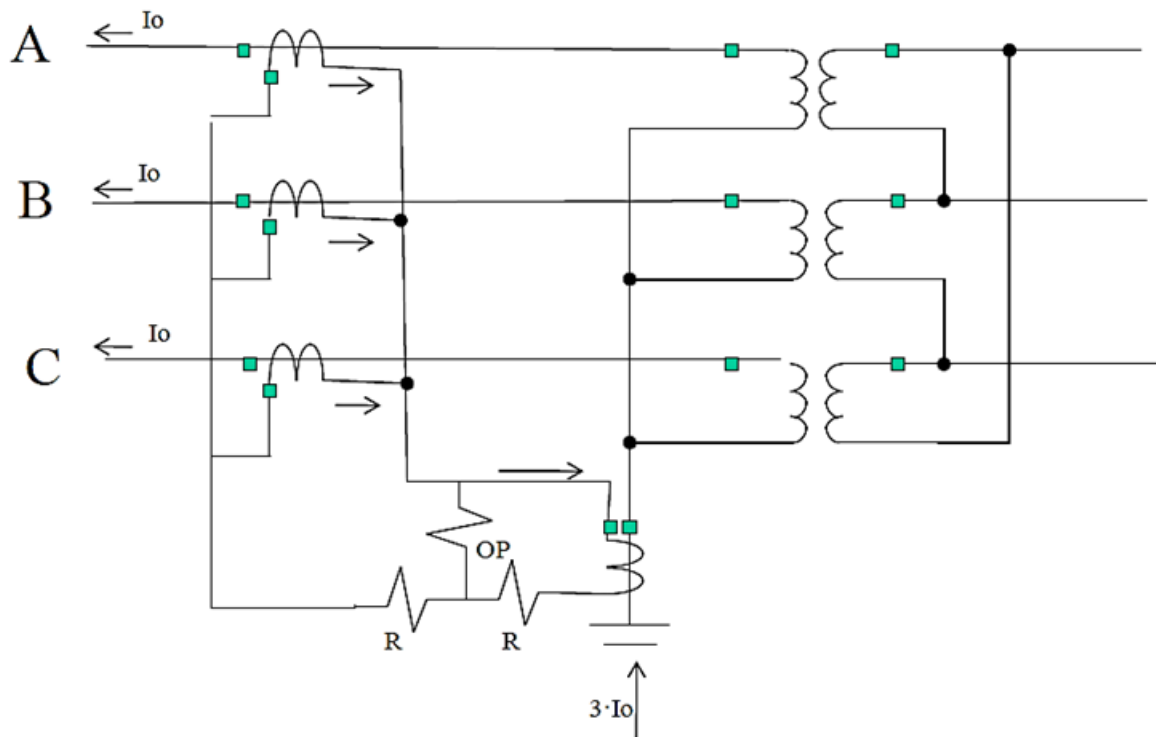


Figura 32 Tierra restringida

Su principio de funcionamiento se fundamenta en la primera ley de Kirchhoff.

Si la suma de las 3 intensidades por fase en la estrella es igual a la intensidad que va hacia la tierra, la falta se ha producido fuera del elemento a proteger al cumplirse la primera ley de Kirchhoff.

$$I_A + I_B + I_C = I_G$$

Sin embargo, si la falta se produce dentro, ya no se cumple la primera ley de Kirchhoff debido a que habrá una derivación a tierra dentro de la máquina que provoca que la suma de las intensidades de las tres fases no sea igual a la corriente proveniente de la tierra.

Por ejemplo, puede haber ocurrido una derivación a tierra en la fase C de modo que la intensidad de la fase C se va directamente a tierra resultando que:

$$I_A + I_B \neq I_G$$

5.1.5 Cálculos de la protección

Como el objetivo de este proyecto es el de ensayar una protección diferencial de un transformador empleando la herramienta Simulink de Matlab, previamente se ha de tener claro qué cálculos y procedimientos se han de realizar con el objetivo de diseñar la protección en sí. Es por ello que en este apartado se incluye un ejemplo de ajuste de protección diferencial de transformador.

El transformador que se ha escogido para ilustrar el ejemplo es el mismo que se va a emplear para la simulación.

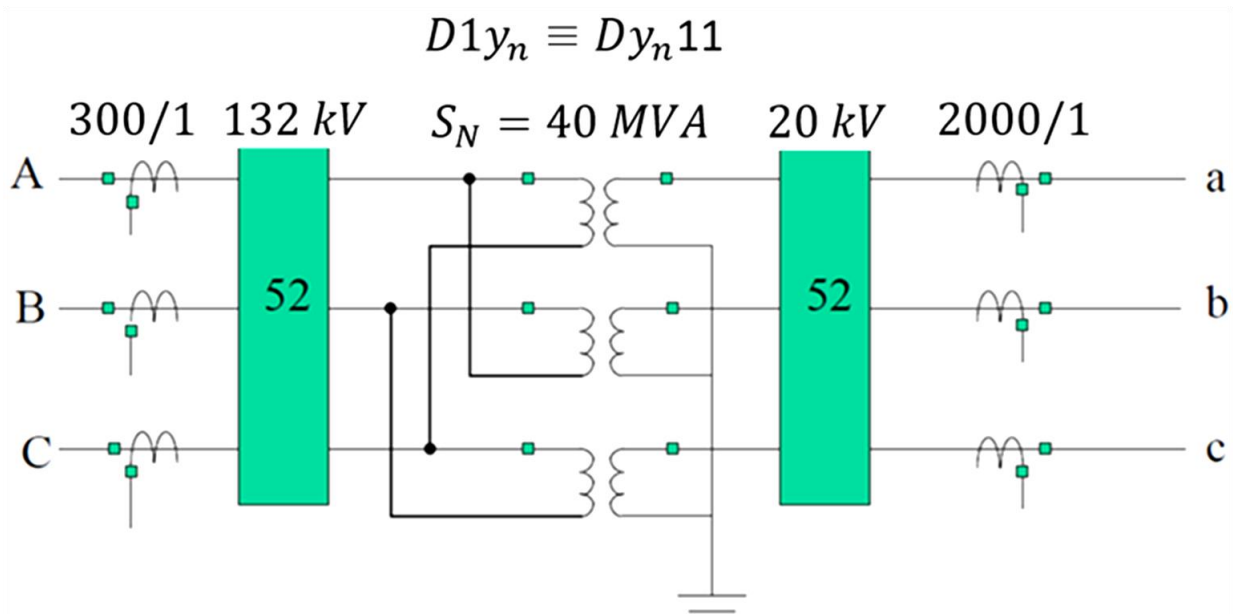


Figura 33 Ejemplo transformador

Recogiendo los datos a emplear:

Tabla 1 Datos del modelo

| Nombre | Siglas | Valor |
|--|----------|---|
| Potencia nominal del transformador de potencia | S_N | 40 MVA |
| Relación de transformación del transformador de intensidad situado en el primario | RTI^p | 300/1 |
| Relación de transformación del transformador de intensidad situado en el secundario | RTI^s | 2000/1 |
| Tensión nominal del lado primario del transformador de potencia | U_{1N} | 132 kV |
| Tensión nominal del lado secundario del transformador de potencia | U_{2N} | 20 kV |
| Intensidad nominal del secundario del TI situado en el lado primario en valores p.u. | TAP^p | $TAP^p = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N} RTI^p}$ |
| Intensidad nominal del secundario del TI en el lado secundario en valores p.u. | TAP^s | $TAP^s = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N} RTI^s}$ |

En primer lugar, se han de calcular las intensidades circulantes por las tres fases del transformador, tanto de alta como de baja.

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = 174,95 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = 1154,70 \text{ A}$$

Dichas intensidades se han de convertir a su valor del secundario de los transformadores de intensidad

$$I_H = \frac{I_{1N}}{RTI^p} = 0.583 \text{ A}$$

$$I_L = \frac{I_{2N}}{RTI^s} = 0.577 \text{ A}$$

Tras ello, se han de poner como valor por unidad. A tal fin, previamente se han de calcular los TAPs que son la intensidad nominal del secundario de los transformadores de intensidad en valores p.u.

$$TAP_H = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N} RTI^p} = 0.583 \text{ A}$$

$$TAP^s = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N} RTI^s} = 0.577 \text{ A}$$

Habiendo calculado los TAPs, simplemente resta calcular las intensidades p.u.

$$I_H^{p.u.} = \frac{I_H}{TAP_H} = 1$$

$$I_L^{p.u.} = \frac{I_L}{TAP_L} = 1$$

A partir de aquí, se procedería a poner en fase, así como a eliminar la intensidad homopolar mediante el uso de las matrices expuestas en el punto 5.1.1.3. dando paso a calcular la intensidad diferencial mediante la ecuación:

$$\begin{pmatrix} Idif_A \\ Idif_B \\ Idif_C \end{pmatrix} = \frac{1}{TAP_H} A_1 \begin{pmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \end{pmatrix} + \frac{1}{TAP_L} A_2 \begin{pmatrix} I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{pmatrix}$$

Tras ello, con los datos calculados en el modelo de Matlab se han extraído el primer, segundo y quinto armónico de la intensidad diferencial, elementos clave para que la protección decida si actúa o no.

5.2 Otras protecciones del transformador

Un paso más en cuanto a la protección de un transformador de potencia viene de la mano de la protección Buchholz. A continuación, se introduce una explicación sobre el funcionamiento de este útil mecanismo.

5.2.1 Protección Buchholz

A fin de dotar a los transformadores de una mayor seguridad frente a faltas internas que pueden suceder durante su funcionamiento, se equipan también con la protección número 63 en los códigos ANSI, denominada Buchholz.

Esta protección no es más que un sencillo relé detector de gases. Normalmente los transformadores de gran tamaño se refrigeran bañando sus bobinas en aceite. Este aceite, debe de tener en todo momento un nivel suficiente para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina y evitar sobrecalentamientos.

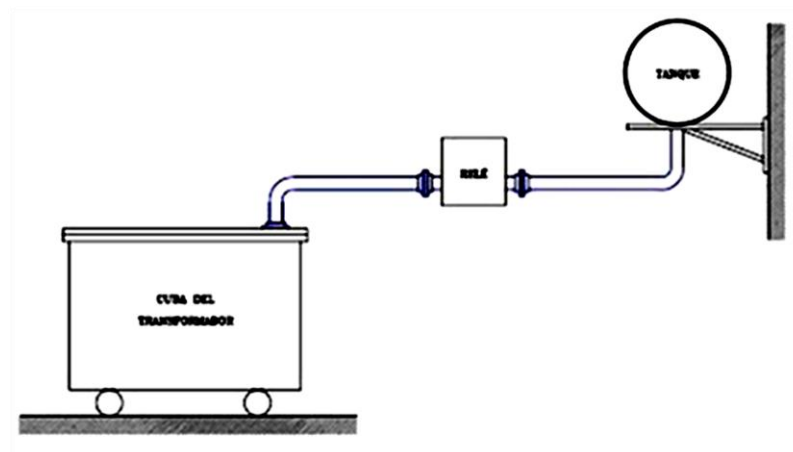


Figura 34 Esquema Buchholz

El tanque de expansión asegura en todo momento el nivel de aceite necesario para que la cuba del transformador esté completamente llena. Así pues, entre la cuba y el tanque se dispone un relé tipo Buchholz el cual no es más que un cajetín lleno de aceite el cual contiene 2 pequeños flotadores móviles.

Bajo una situación de falta interna en la cuba del transformador, surgen unas burbujas en el aceite las cuales por diferencia de densidades van subiendo por la conducción. Dichas burbujas quedan atrapadas en la caja del relé, en la parte superior del mismo para ser más exactos. Esto causa que el flotador a1 vaya descendiendo a la par que el nivel de aceite contenido en él, llegando a un punto tal que se produce el cierre del interruptor c1, activando el contacto A. Este contacto es el encargado de hacer saltar una primera alarma de aviso para informar de que alguna anomalía se ha producido en el interior de la cuba sin llegar a aislarlo de la red.

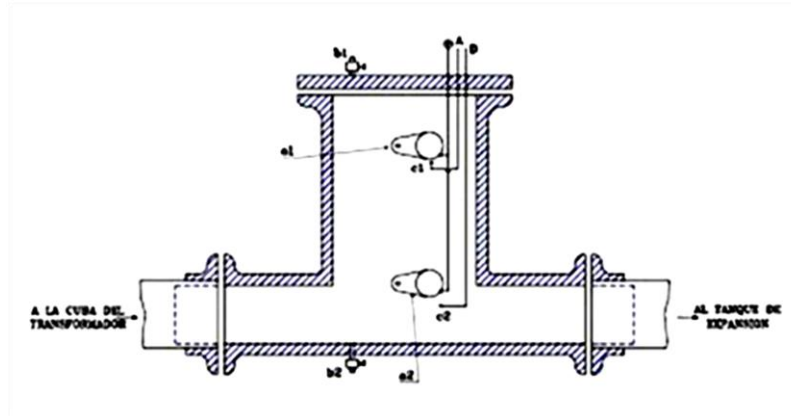


Figura 35 Relé Buchholz

Si la falta persiste o, es de una magnitud tal que súbitamente las burbujas ascienden en régimen turbulento de operación, se da lugar a la actuación del interruptor c2 cerrando el contacto D siendo éste de disparo y dejando al transformador fuera de servicio.

Además de en circunstancias de falta interna, este método también actúa ante situaciones de escasez de aceite dando de preaviso.

La salida de los gases se efectúa por un grifo b1 situado en la parte superior del instrumento.



Figura 36 Protección Buchholz

5.2.2 Sudden Pressure Relay SPR

Frente a la protección Buchholz, en EEUU es más habitual toparse con la Sudden Pressure Relay protection (relé de presión súbita). Esto se justifica por el simple hecho de que el depósito de expansión es inexistente y la cuba del transformador va totalmente sellada. De manera que, bajo una situación de falta, la presión en el depósito asciende y el relé lo detecta y actúa en consecuencia para mitigar la falta.

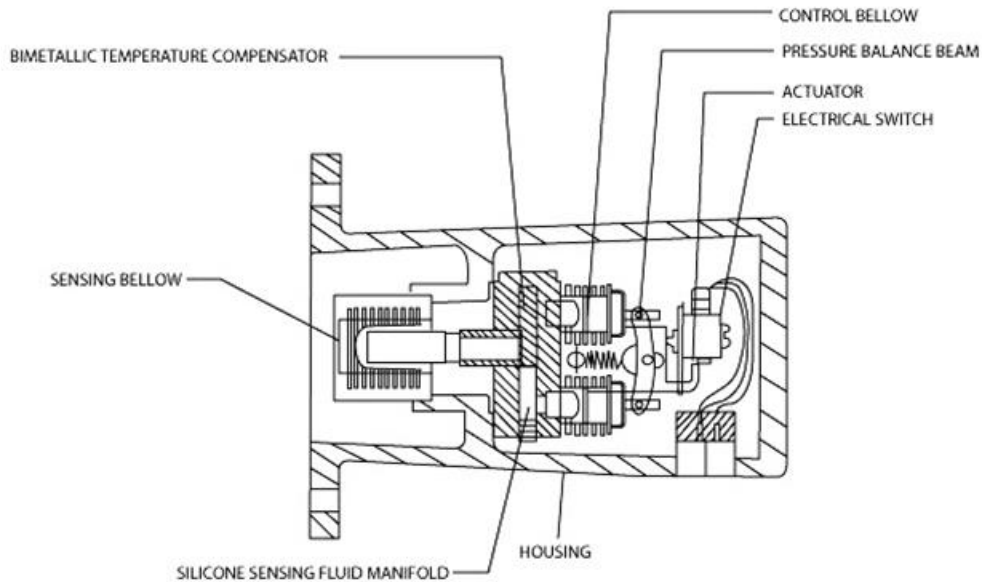


Figura 37 Esquema SPR

La forma de operación de esta protección se fundamenta en la detección del incremento de la presión en el interior de la cuba mediante tres fuelles que cuenta el relé. Ante cambios bruscos de presión, los fuelles se ven desplazados, activan la señal de disparo y aíslan el transformador de la red a la que se encuentra conectado.

6 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

Tras la contextualización teórica, se incluye en este apartado el modelo de línea construido junto al modelo de la protección diferencial, así como los ensayos simulados.

6.1 Simulación de la protección diferencial

La protección diferencial se ha simulado haciendo uso del software que trae consigo el programa Matlab Simulink para realizar simulaciones. A continuación, se muestra el modelo de protección diferencial construido.

6.1.1 Modelo de red simulado

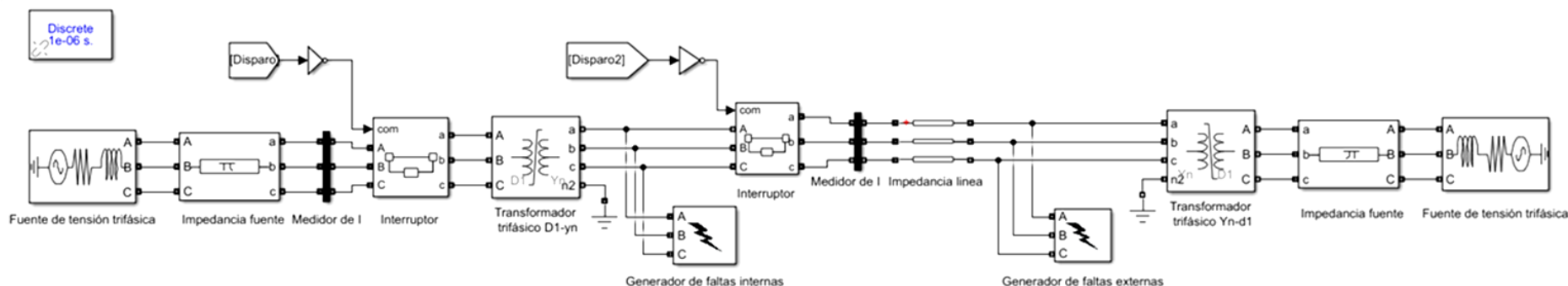


Figura 38 Modelo de la simulación I

En esta sección se explica el modelo de red utilizado para instalar sobre él la protección diferencial.

Bloques que conforman el modelo de la red:

- Fuentes de tensión trifásicas (2): A ambos lados de la red se han incorporado las fuentes de tensión necesarias para energizar la línea.
- Impedancias fuente (2): Encargadas de representar toda la impedancia existente hasta los medidores trifásicos de intensidad.
- Medidores I trifásicos (2): Estos bloques son los encargados de medir el valor de la intensidad a ambos lados del elemento a proteger. Toman el papel de los TI que se instalan en una línea real. Son bloques de gran relevancia debido a que recogen las intensidades **IABC** e **Iabc** que se envían al modelo de la protección diferencial para realizar los correspondientes cálculos.
- Interruptores (2): Situados a ambos lados del elemento a proteger. Su tarea es la de abrir las tres fases del circuito ante una situación de falta interna tras recibir la orden del relé. A su vez los interruptores están unidos a dos boques, disparo y disparo2 a través del operador lógico NOT encargados de enviar la señal de disparo. Al recibir la señal de disparo (1), ambos enviarán el valor negado de éste, un (0), valor que equivale a abrir los interruptores del circuito.
- Transformadores trifásicos (2): Los transformadores escogidos para la simulación son un D1-yn y un Yn-d1. Se va a proteger el transformador situado en el lado izquierdo del modelo. Estos bloques a su vez incluyen todos los valores necesarios para definir un transformador de forma completa.
- Impedancias línea (1) Este bloque simula todos los parámetros implícitos derivados de una línea de distribución. La reactancia, conductancia e inductancia de un cable a lo largo de toda la longitud del mismo.
- Generadores de faltas (2): Este bloque tiene la finalidad de generar en el sistema cualquier tipo de falta. En este proyecto se emplea tanto para simular faltas internas como las faltas externas al elemento a proteger.

En la sección de anexos se detallan las figuras de todos los *block parameters* del programa, donde se especifican las variables impuestas a cada bloque.

6.1.2 Modelo de la protección diferencial

En esta página y la siguiente se recogen las capturas de todos los bloques correspondientes al modelo de la protección diferencial simulado.

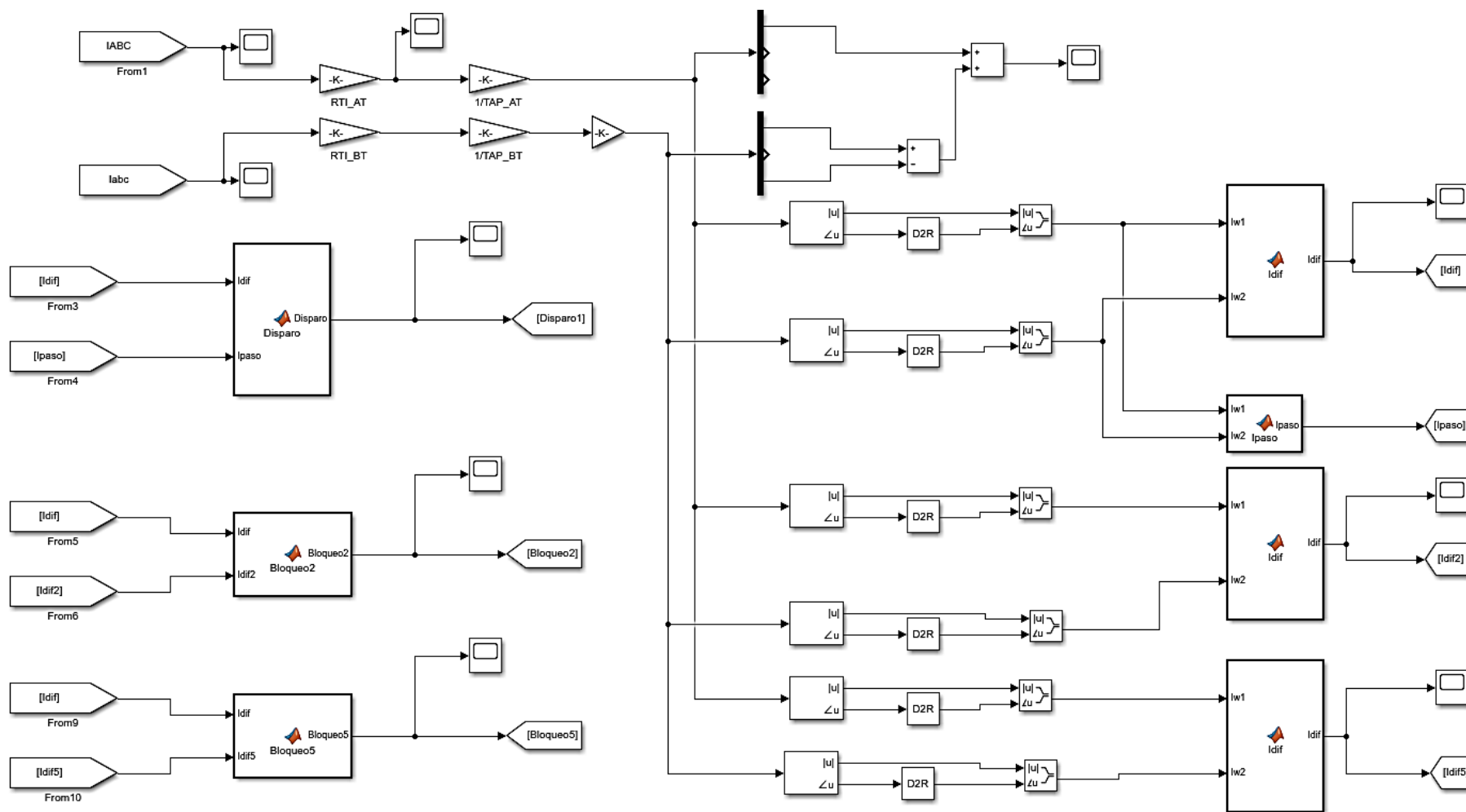


Figura 39 Modelo de la simulación II

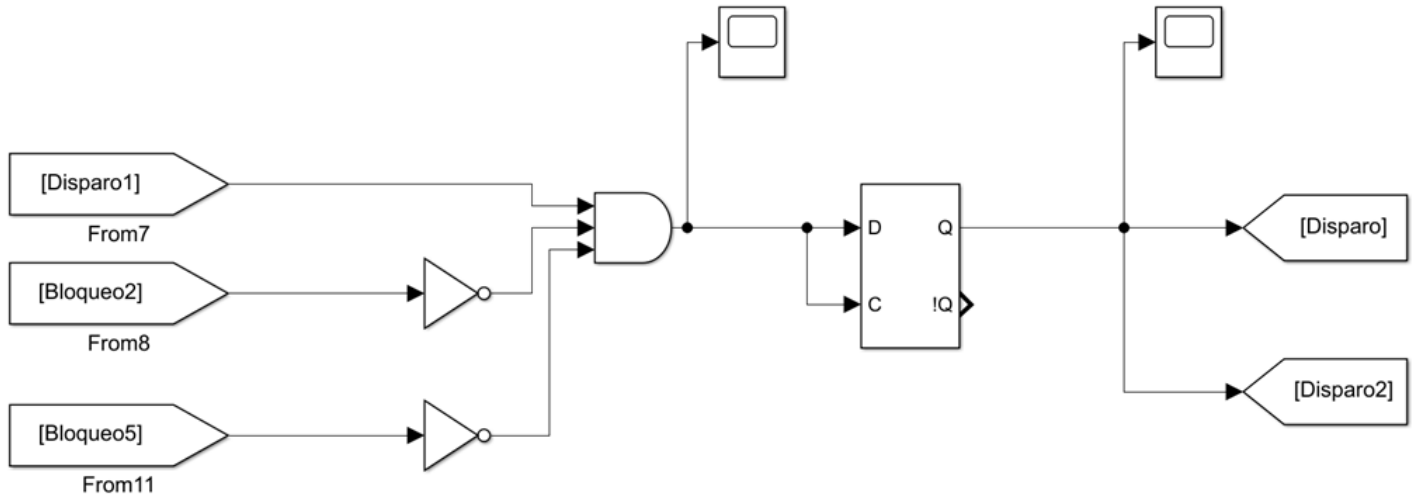


Figura 40 Modelo de la simulación III

El modelo de la protección diferencial adquiere una gran envergadura. Debido a su gran dimensión, en las siguientes líneas se va a tratar de dar una explicación detallada acerca de las diferentes partes que lo componen.

6.1.2.1 Cálculo de la intensidad diferencial, intensidad de paso y sus armónicos

Previamente a mostrar el modelo de los bloques relativos a la intensidad diferencial se muestran a continuación los valores de variables escogidas para hacer los cálculos de la simulación.

Al tratarse de un número pequeño de variables, se ha optado por introducir dichos valores desde el propio Simulink, escribiéndolos dentro de la sección de Model settings, seleccionando model properties y, dentro de ésta seleccionando la pestaña de Callbacks para rellenar los campos de InitFcn y StartFcn.

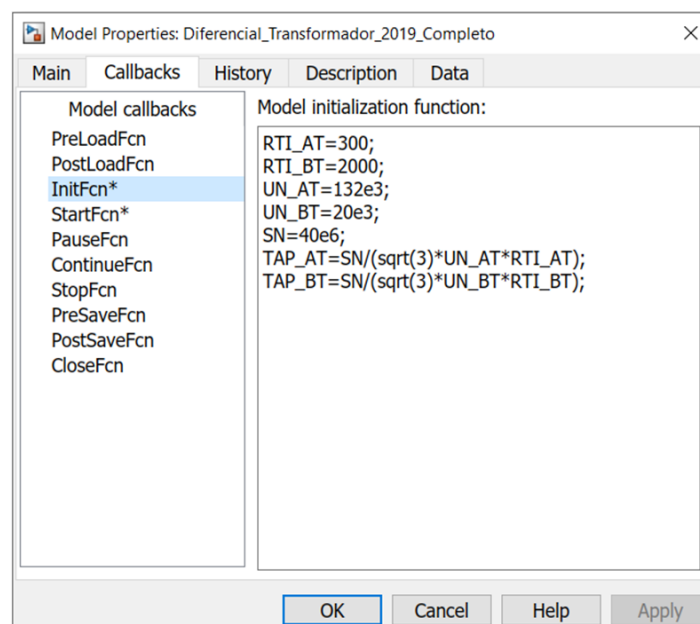


Figura 41 Valores de los datos utilizados

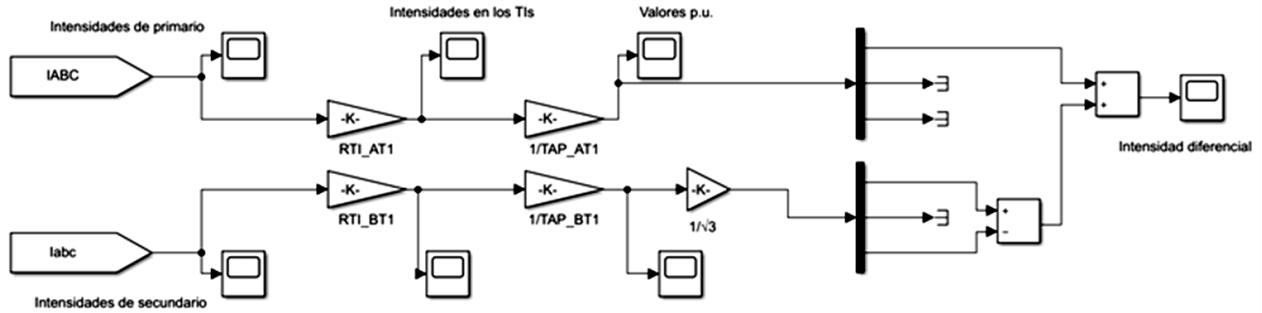


Figura 42 Cálculo intensidad diferencial

La explicación del modelo de la protección diferencial se va a realizar para un funcionamiento del sistema sin faltas, de esta manera se clarifica su funcionamiento para, después, someterlo a faltas y ver cómo se comporta. Las simulaciones se han realizado para 5 ciclos lo que equivale a 0.1 segundos.

En primer lugar, se recogen las mediciones de los medidores de intensidad trifásicos, esto es, las intensidades de primario del transformador, **IABC** y las del secundario, **Iabc**. A continuación, tal y como se explicó en el punto 5.1.5, se pasan a su valor en el secundario de los TIs dividiendo entre la correspondiente RT y de seguido, se dividen entre los TAPs para conseguir disponer de las intensidades en valores p.u.

Hágase hincapié en el estado equilibrado de las corrientes debido a que en el ejemplo no ocurre falta ninguna.

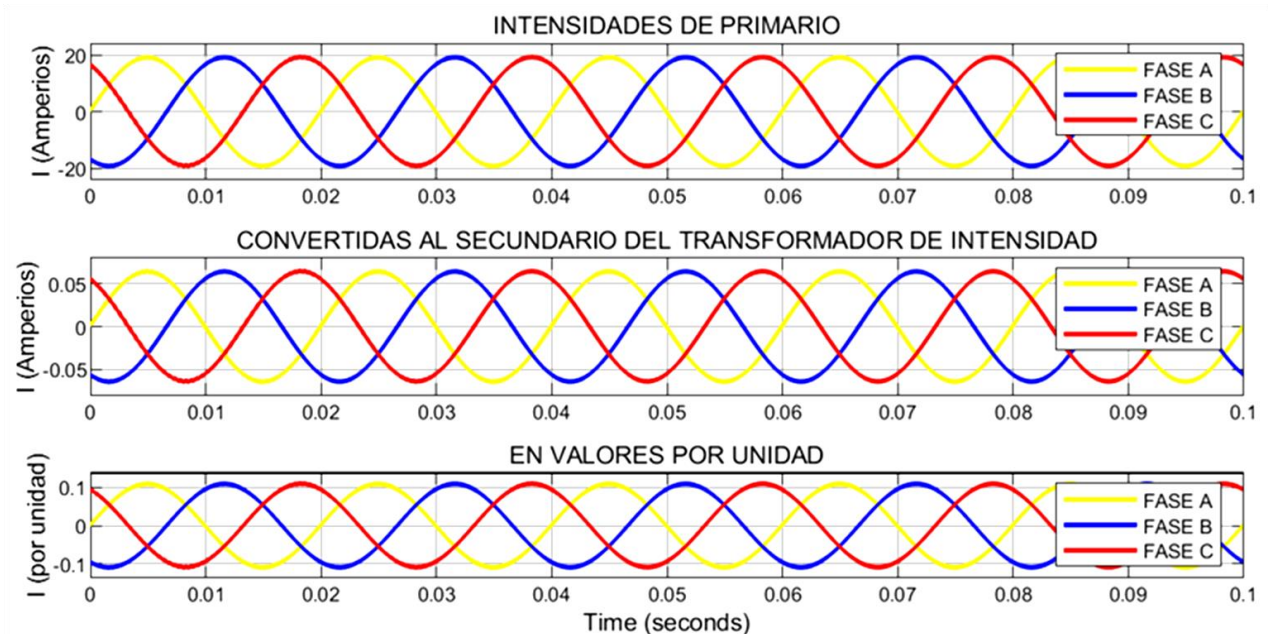


Figura 43 Intensidades de primario

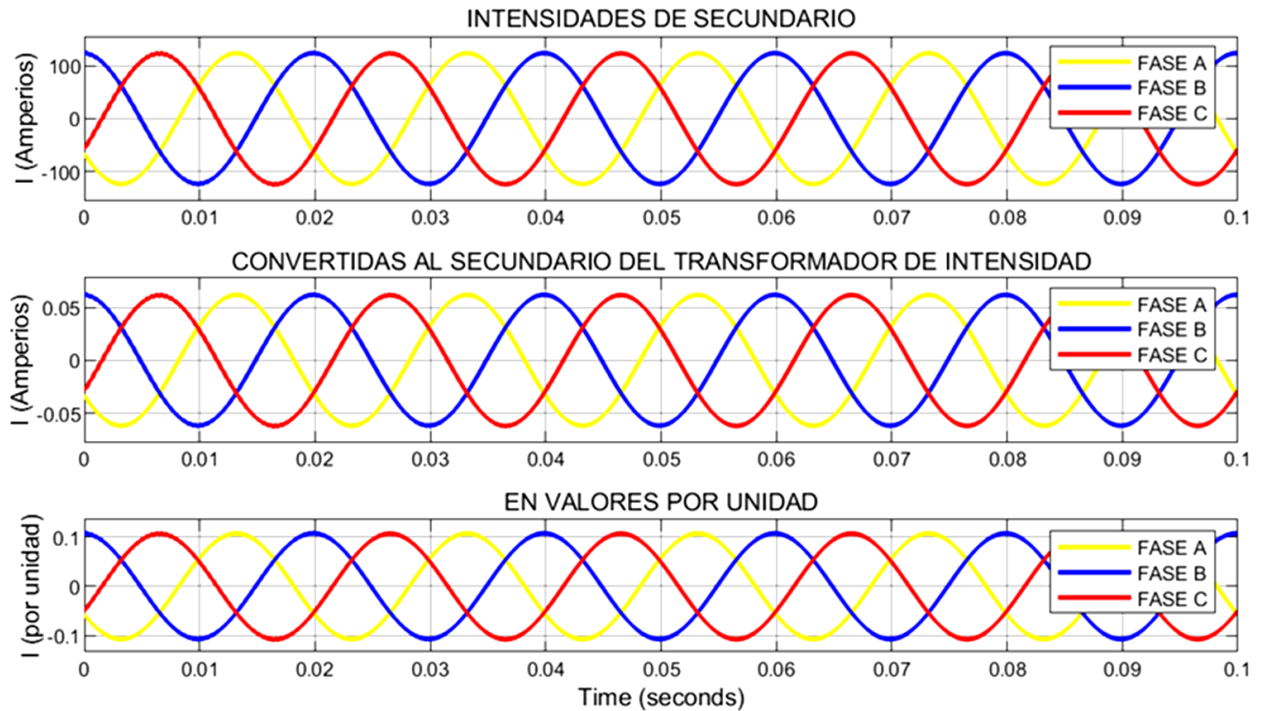


Figura 44 Intensidades de secundario

Posteriormente, se calcula la intensidad diferencial. A tal objetivo, se han de poner en fase las intensidades, así como también para el lado de la estrella se tiene que eliminar la contribución de la homopolar. Esto se realiza mediante la aplicación de la matriz ya explicada en el punto 5.1.1.3. En el modelo queda representado con el uso de 2 demultiplexores. El del lado de primario sería prescindible para el transformador que atañe en este trabajo. Para el lado secundario, con el bobinado en estrella, es necesario su uso con el objetivo de restar 2 fases de la estrella y así obviar la homopolar. Finalmente, se suman las 2 intensidades consiguiendo así la diferencia de las intensidades entrantes y salientes a los TIs.

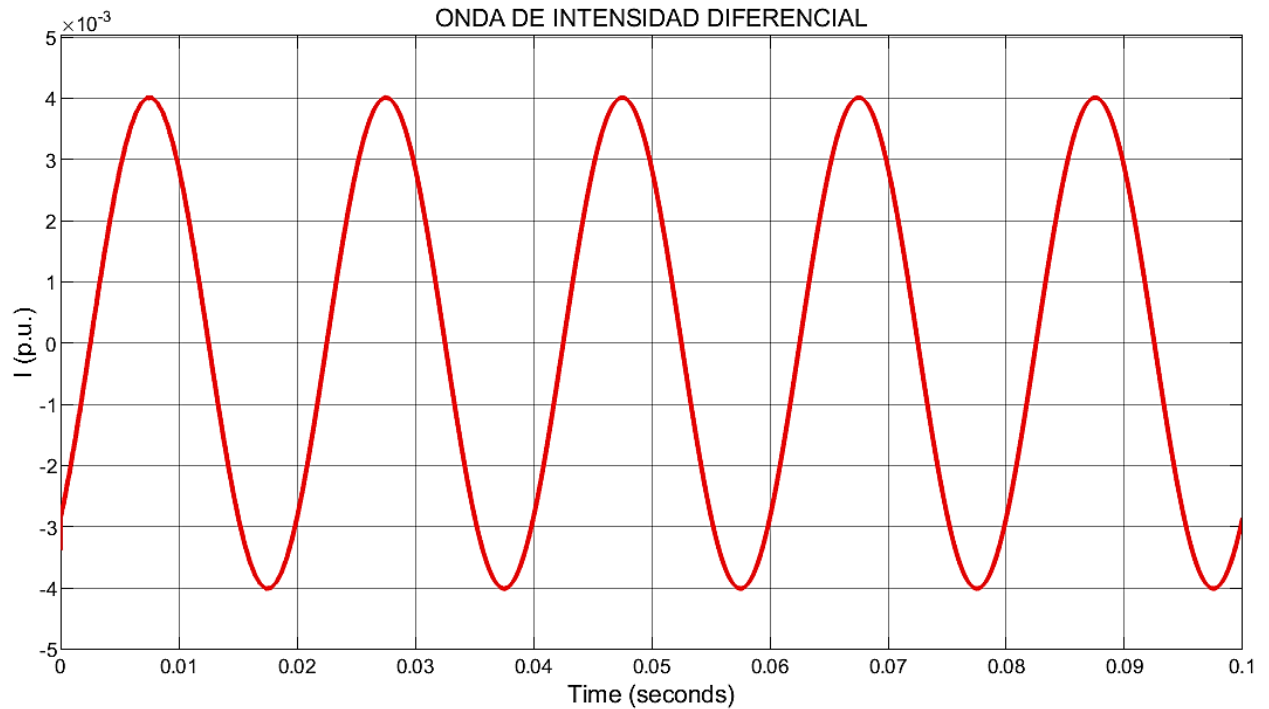


Figura 45 Onda de diferencia de intensidades entrantes y salientes a los TIs

Se comprueba que durante el funcionamiento normal del transformador la única intensidad que surge no es otra que la intensidad de vacío cuyo valor es irrisorio (en la gráfica del orden de 10^{-3})

El siguiente paso se basa en el cálculo de los armónicos. Tomando los datos de las intensidades en valor p.u. calculadas anteriormente se aplica el análisis de Fourier para extraer el primer, segundo y quinto armónico que son los que competen para esta protección.

Se emplea el bloque de Fourier y se le indica que se quiere extraer el primer armónico.

Habiendo convertido los ángulos obtenidos de grados a radianes se introducen las intensidades entrantes y salientes de los TIs como variables de entrada a funciones de Matlab; una para calcular el primer armónico de la intensidad diferencial y otra para la intensidad de paso. Dichas funciones devuelven el armónico fundamental de la intensidad diferencial y la intensidad de paso resultando:

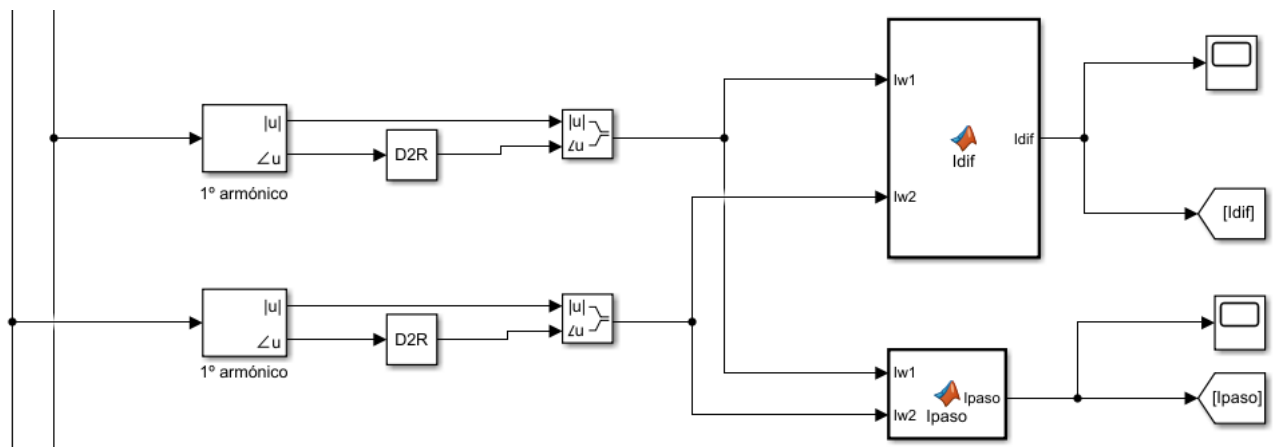


Figura 46 Cálculo del armónico fundamental

El código de las funciones generadas se incluye a continuación. Simplemente se han de calcular tanto la intensidad diferencial y la de paso de acuerdo a las fórmulas mostradas en el punto 5.1 para cada una de las 3 fases.

```
function Idif = Idif(Iw1,Iw2)

Idif=zeros(3,1);

Idif(1)=abs(Iw1(1)+(Iw2(1)-Iw2(3)));
Idif(2)=abs(Iw1(2)+(Iw2(2)-Iw2(1)));
Idif(3)=abs(Iw1(3)+(Iw2(3)-Iw2(2)));
```

Figura 47 Función de la intensidad diferencial

```
function Ipaso = Ipaso(Iw1,Iw2)

Ipaso=zeros(3,1);

Ipaso(1)=(abs(Iw1(1))+abs((Iw2(1)-Iw2(3))));
Ipaso(2)=(abs(Iw1(2))+abs((Iw2(2)-Iw2(1))));
Ipaso(3)=(abs(Iw1(3))+abs((Iw2(3)-Iw2(2))));
```

Figura 48 Función de la intensidad de paso

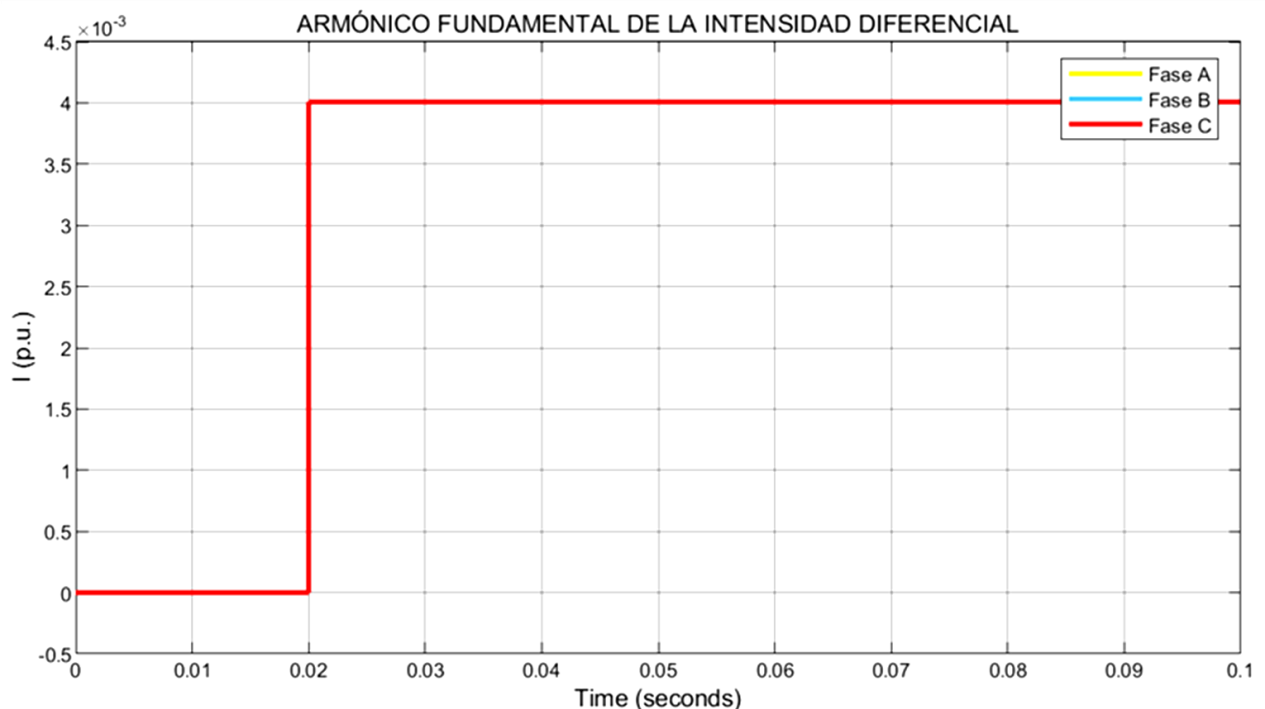


Figura 49 Armónico fundamental de la intensidad diferencial

La figura 49 muestra el primer armónico de la intensidad diferencial en circunstancias normales de funcionamiento. Comienza a dar valores a partir de 0.02 segundos debido a que el bloque de Fourier de Matlab necesita un ciclo para poder efectuar el cálculo.

Se muestra también, en la siguiente figura el armónico fundamental de la intensidad de paso.

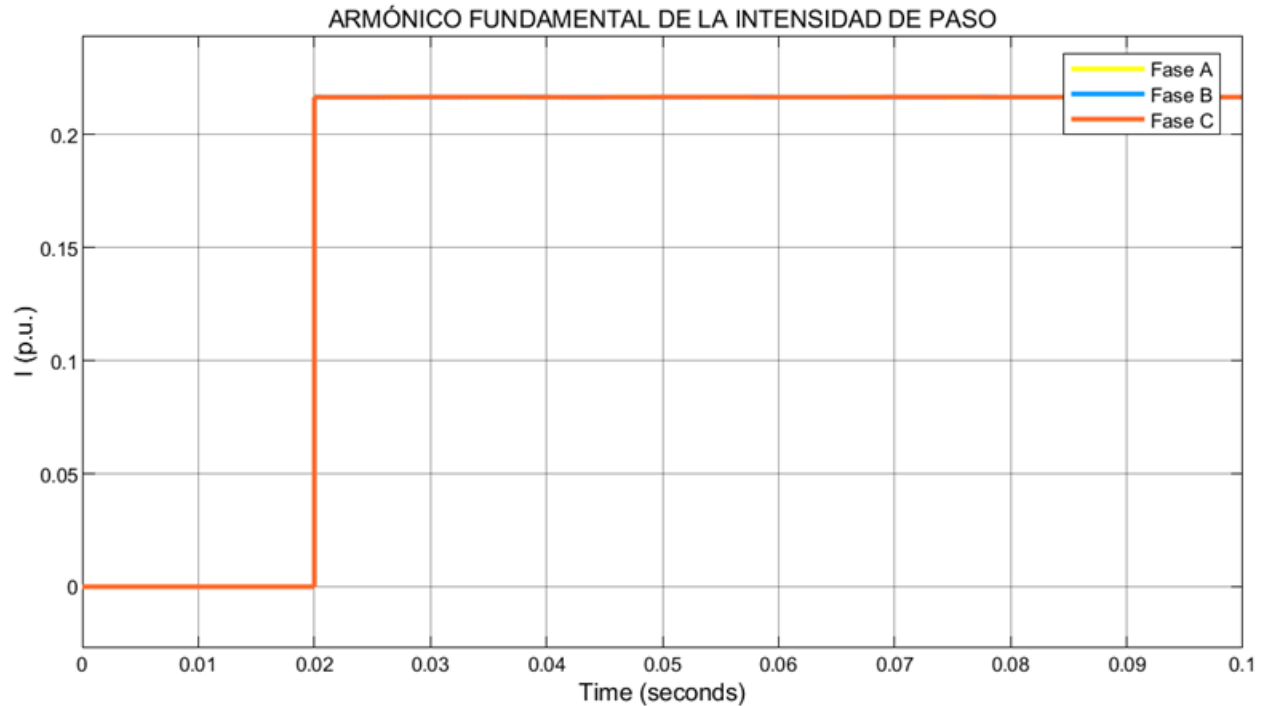


Figura 50 Armónico fundamental de la intensidad de paso

De forma análoga, el modo de proceder para el segundo y quinto armónico es el mismo que para el armónico fundamental. Se extraen en su caso el segundo o el quinto armónico de las ondas de intensidades entrantes y salientes a los TIs en valor p.u. para después, tras pasar el valor de los ángulos a radianes, introducirlos como valor de entrada a la función que devuelve el armónico correspondiente de la onda de corriente diferencial. La función implementada para dicho cálculo es idéntica a la mostrada en la figura 47.

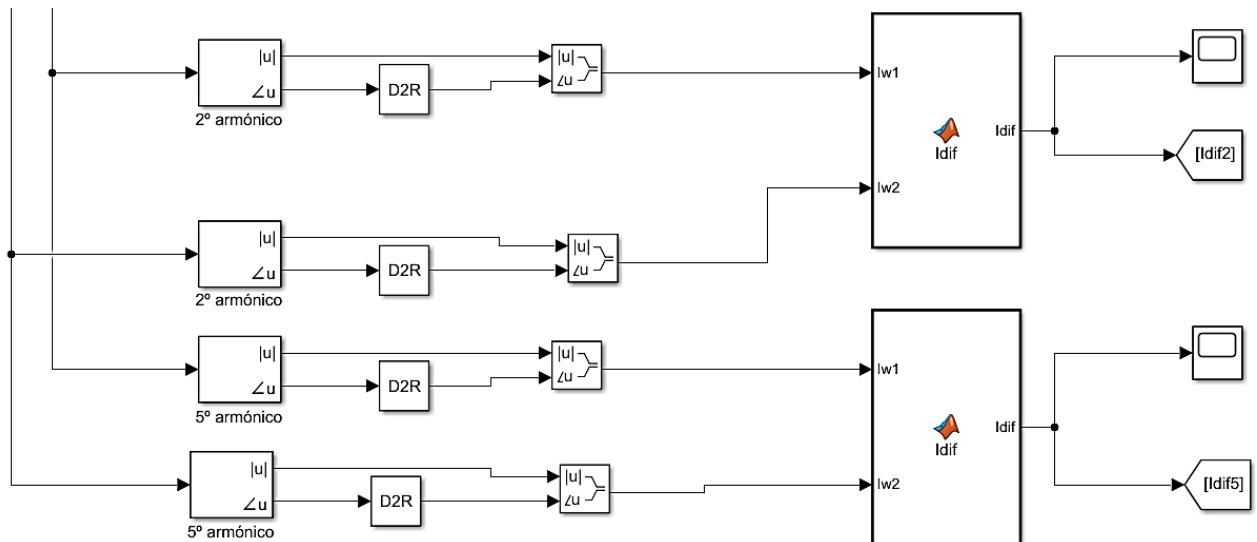


Figura 51 Cálculo de segundo y quinto armónico de la onda de intensidad diferencial

Las gráficas correspondientes al segundo y quinto armónico se ilustran a continuación:

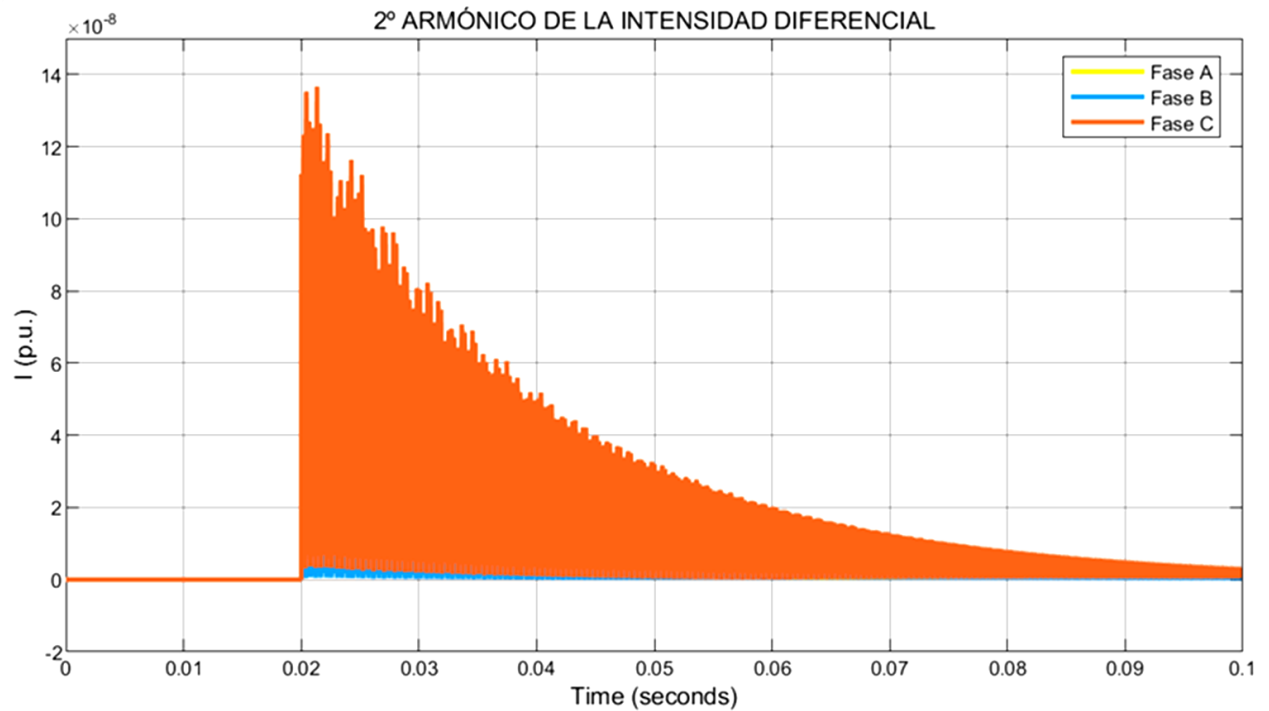


Figura 52 Segundo armónico de la intensidad diferencial

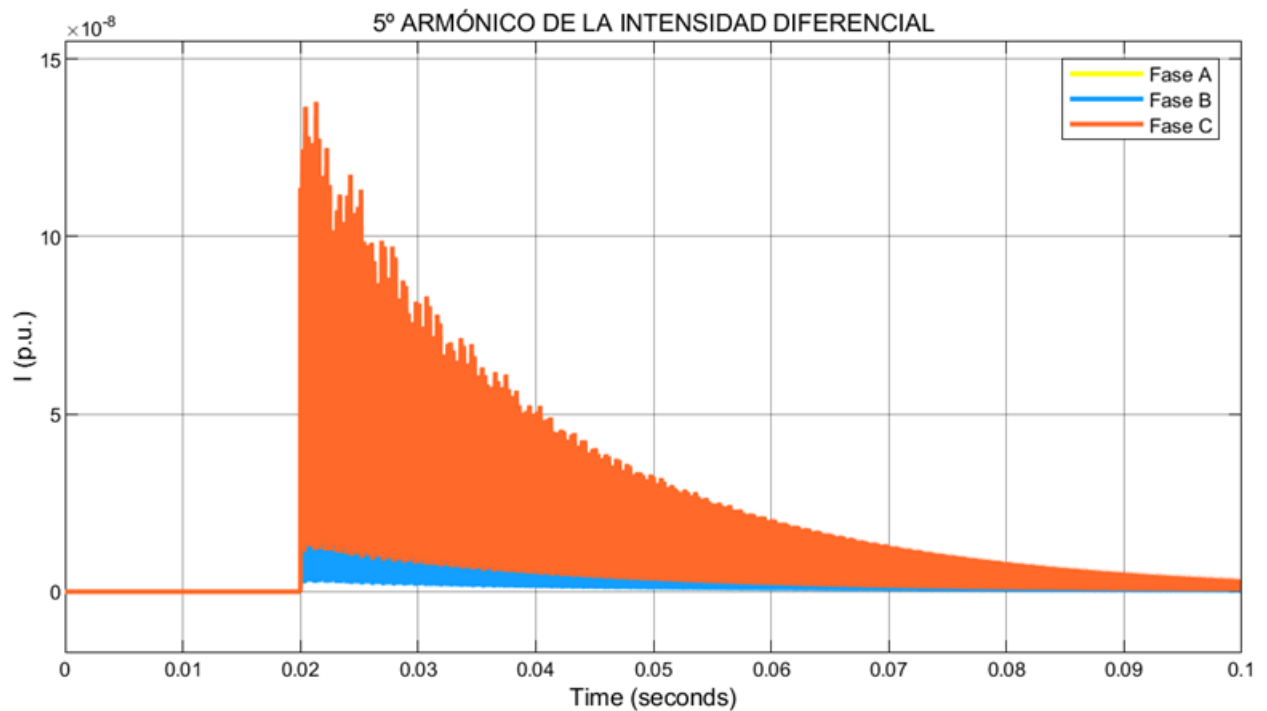


Figura 53 Quinto armónico de la intensidad diferencial

Tanto segundo como quinto armónico toman un valor de 0 bajo condiciones normales de funcionamiento. En el transitorio, la discrepancia de los valores que toman las 3 fases es debido al ángulo de incidencia con el que se entra a cada fase.

6.1.2.1 Cálculo de las funciones de disparo y de bloqueo

Una vez conseguidos los armónicos de la onda se procede a generar las órdenes de disparo, así como de bloqueo por segundo y quinto armónico. En base de los armónicos calculados habiendo recogido la información de las intensidades que circulan por el circuito de los TI se han de generar las funciones capaces de discriminar el disparo por falta interna, así como el bloqueo del mismo ante situaciones de conexión (por segundo armónico) y de sobreexcitación (por quinto armónico).

Así pues, para generar la orden de disparo se ha de implementar una función que toma como variable de entrada los armónicos fundamentales tanto de la corriente diferencial como de la de paso y, en función de los valores de estos, la orden de disparo se actuará devolviendo el valor (1) o no actuará, dando lugar a un (0) en la salida.

```
function Disparo=Disparo(Idif, Ipaso)

Disparo=0;

if (Idif(1)>0.2) && (Idif(1)>0.3*Ipaso(1))
    Disparo=1;

elseif (Idif(2)>0.2) && (Idif(2)>0.3*Ipaso(2))
    Disparo=1;

elseif (Idif(3)>0.2) && (Idif(3)>0.3*Ipaso(3))
    Disparo=1;

end
```

Figura 54 Función de disparo

Para cada una de las 3 fases, se ejecuta la orden de disparo si:

- La intensidad diferencial supera 0.2 veces el TAP.
- La intensidad diferencial alcanza un valor superior a 0.3 veces la intensidad de paso.

Estos valores dan lugar a generar la curva de disparo típica en la protección diferencial explicada en el apartado 5.1.2.



Figura 55 Curva de disparo

Así pues, el modelo del disparo queda:

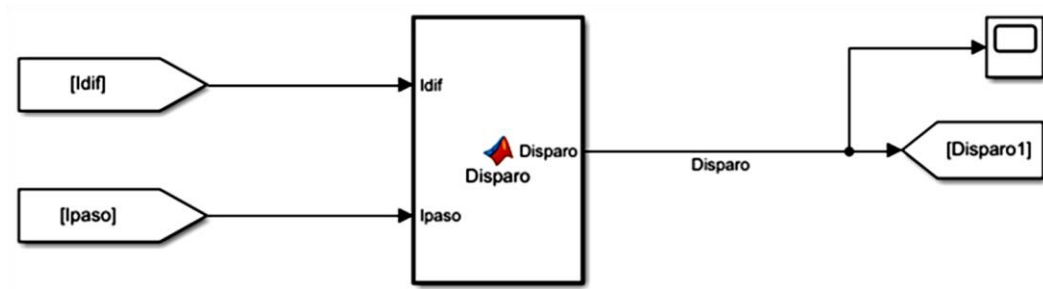


Figura 56 Modelo de la orden de disparo

Para bloquear el disparo bajo una situación de energización del transformador se ha implementado la función de bloqueo por segundo armónico.

```
function Bloqueo2=Bloqueo2(Idif,Idif2)

Bloqueo2=0;

if Idif2(1)/(Idif(1)+1e-6)>0.15
    Bloqueo2=1;

elseif Idif2(2)/(Idif(2)+1e-6)>0.15
    Bloqueo2=1;

elseif Idif2(3)/(Idif(3)+1e-6)>0.15
    Bloqueo2=1;

end
```

Figura 57 Función de bloqueo por segundo armónico

Las variables de entrada a la función son el primer armónico y el segundo armónico de la intensidad diferencial. Si para cada una de las 3 fases la relación entre el segundo y primer armónico supera un 15% del TAP, el bloqueo por segundo armónico entra en juego, dando lugar al valor (1) en la salida.

El modelo resulta:

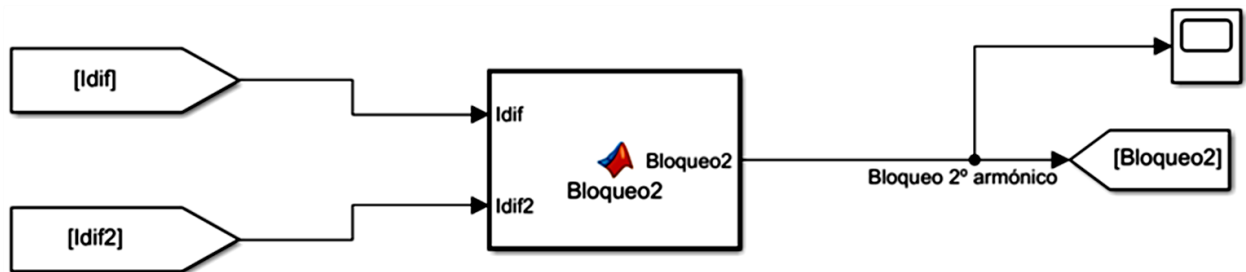


Figura 58 Modelo del bloqueo por segundo armónico

Para bloquear el disparo bajo una situación de sobreexcitación del transformador se ha implementado la función de bloqueo por quinto armónico.

```
function Bloqueo5=Bloqueo5(Idif,Idif5)

Bloqueo5=0;

if Idif5(1)/(Idif(1)+1e-6)>0.25
    Bloqueo5=1;

elseif Idif5(2)/(Idif(2)+1e-6)>0.25
    Bloqueo5=1;

elseif Idif5(3)/(Idif(3)+1e-6)>0.25
    Bloqueo5=1;

end
```

Figura 59 Función de bloqueo por quinto armónico

Se procede de igual manera que para el bloqueo por segundo armónico. En este caso, sin embargo, se procede a bloquear el disparo, esto es, el valor Bloqueo5 toma el valor (1) a la salida si, la relación entre quinto y primer armónico de la intensidad diferencial toma un valor superior a 0.25 veces el TAP.

El modelo de bloqueo por quinto armónico resulta:

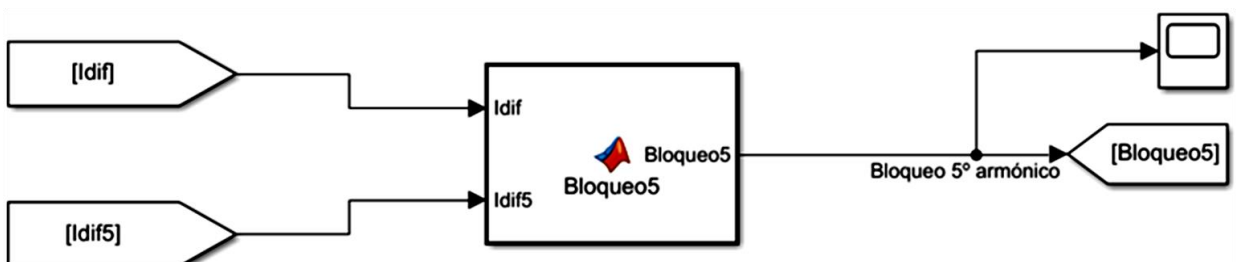


Figura 60 Modelo de bloqueo por quinto armónico

Las salidas proporcionadas por las 3 funciones descritas se muestran en la siguiente figura. Como se intuye lógico, para la situación de funcionamiento normal del transformador de potencia las salidas de las funciones implementadas toman el valor (0) que equivale a que la protección no efectúe disparo.

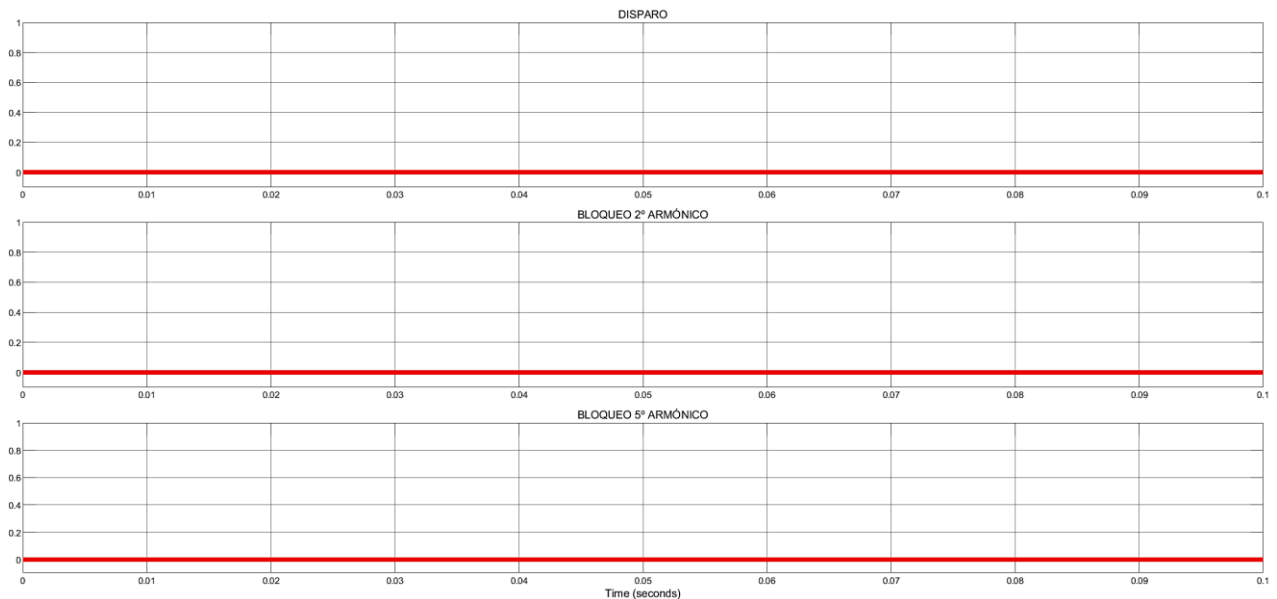


Figura 61 Salidas de las funciones descritas

6.1.2.2 Tratamiento de la orden de disparo

El paso final de esta protección diferencial consiste en el tratamiento de las señales de salida implementadas en las funciones del punto anterior. Las 3 variables de salida de las funciones (Disparo1, Bloqueo2, Bloqueo5) se introducen en una puerta AND como variables de entrada a la misma. En concreto, las variables Bloqueo 2 y Bloqueo5 se introducen negadas tras pasar por bloques NOT.

La puerta AND recoge en todo momento la simultaneidad de los valores de las señales de las 3 funciones. Los diferentes escenarios que pueden ocurrir son 4: Falta interna, falta externa, conexión y sobreexcitación.

- Falta interna: Disparo1 toma el valor (1) debido a que correctamente la protección interpreta que debe efectuar el disparo. Los bloqueos no actúan por lo que devuelven un valor (0). Consecuentemente, se han de negar para que a la entrada de la puerta AND se obtengan tres (1s) que, multiplicados, devuelven un (1) a la salida de la puerta AND.
- Falta externa: Disparo1 toma un valor (0) por lo que independientemente de la forma de operación de los bloqueos, la salida del AND toma un valor (0) en ese instante.
- Conexión: El Disparo1 adquiere el valor (1) ya que interpretaría la conexión como falta interna. Sin embargo, el bloqueo2 actúa dando lugar a un valor (1) el cual negado toma el valor (0). Por consiguiente, a la salida del AND se obtiene el valor (0).
- Sobreexcitación: Análogamente a la conexión en este caso el encargado de anular la orden de Disparo1 es el Bloqueo5 que toma el valor (1) cuyo negado es (0) dando lugar en la salida a un (0).

Tabla 2 Entradas y salidas a la puerta AND

| | Disparo1 | Bloqueo2 | Negado | Bloqueo5 | Negado | Salida de AND |
|-----------------|----------|----------|--------|----------|--------|---------------|
| Falta interna | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Falta externa | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Conexión | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Sobreexcitación | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

A continuación, el valor de salida de la puerta AND se introduce en un D-Latch, tanto en su entrada D como en el enable. La tabla de la verdad de este dispositivo se muestra a continuación:

Tabla 3 Tabla de la verdad de un D-Latch

| Enable | D | Q+ |
|--------|---|----|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | Q |
| 0 | 0 | Q |

Los valores que se introducen el Latch son ó (0) ó (1) y por consiguiente, la salida del mismo será ó (1) ó (0):

- 1: Dispara y la protección diferencial actúa abriendo los interruptores.
- 0: No dispara.

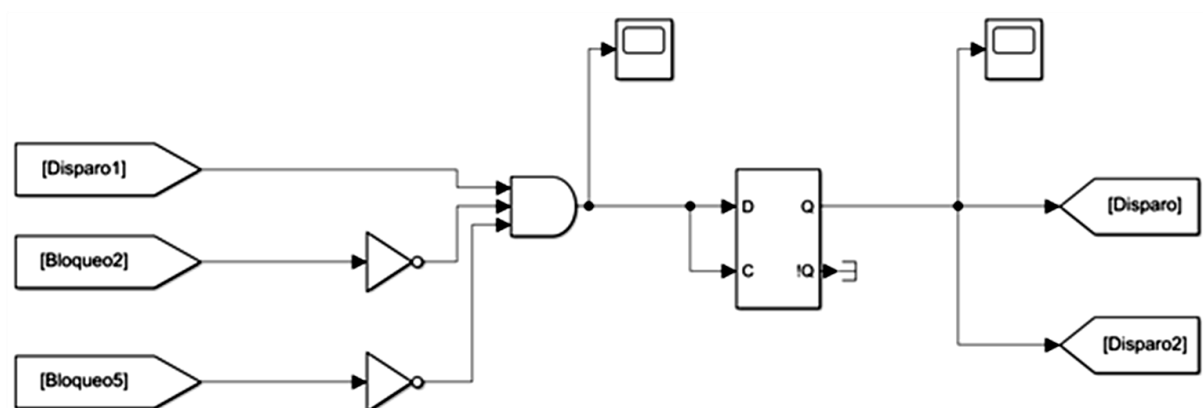


Figura 62 Esquema de la orden de disparo

6.2 Ensayo ante faltas

El modelo desarrollado se ha puesto a prueba tanto ante faltas internas como externas. Asimismo, se ha testeado para una situación de conexión y de sobreexcitación del transformador.

Para el caso de faltas internas la protección sí debe de actuar mientras que para faltas externas no. A su vez, para el conexionado y para la sobreexcitación del elemento la protección tampoco debe actuar, hecho que se consigue mediante los debidos bloqueos.

Las faltas que se han simulado han sido: monofásicas a tierra, bifásicas, bifásicas a tierra y trifásicas.

Tabla 4 Faltas ensayadas

| FALTAS | | | |
|----------------------|-----|----------------------|-----|
| INTERNAS | | EXTERNAS | |
| MONOFÁSICAS A TIERRA | AG | MONOFÁSICAS A TIERRA | AG |
| | BG | | BG |
| | CG | | CG |
| BIFÁSICAS | AB | BIFÁSICAS | AB |
| | BC | | BC |
| | CA | | CA |
| BIFÁSICAS A TIERRA | ABG | BIFÁSICAS A TIERRA | ABG |
| | BCG | | BCG |
| | CAG | | CAG |
| TRIFÁSICAS | ABC | TRIFÁSICAS | ABC |

A continuación, se incluye el método de actuación de la protección ante faltas internas y externas monofásicas a tierra. Una vez comprendido el modo de actuar ante este tipo de faltas y ante la equivalencia de operación de la protección, en la sección de anexos se incluyen las gráficas correspondientes al resto de las faltas.

6.2.1 Faltas internas

6.2.1.1 Faltas internas monofásicas

En este apartado se comprueba el correcto funcionamiento de la protección frente a una situación de falta interna en el transformador. Debido a la equivalencia de faltas monofásicas de las 3 fases (A, B y C), se va a incluir el modo de operación frente a una falta monofásica, por ejemplo, en la fase A. En las otras 2 fases, se da fe de que funciona exactamente de igual manera.

Se ha simulado el modelo frente a una falta interna monofásica tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

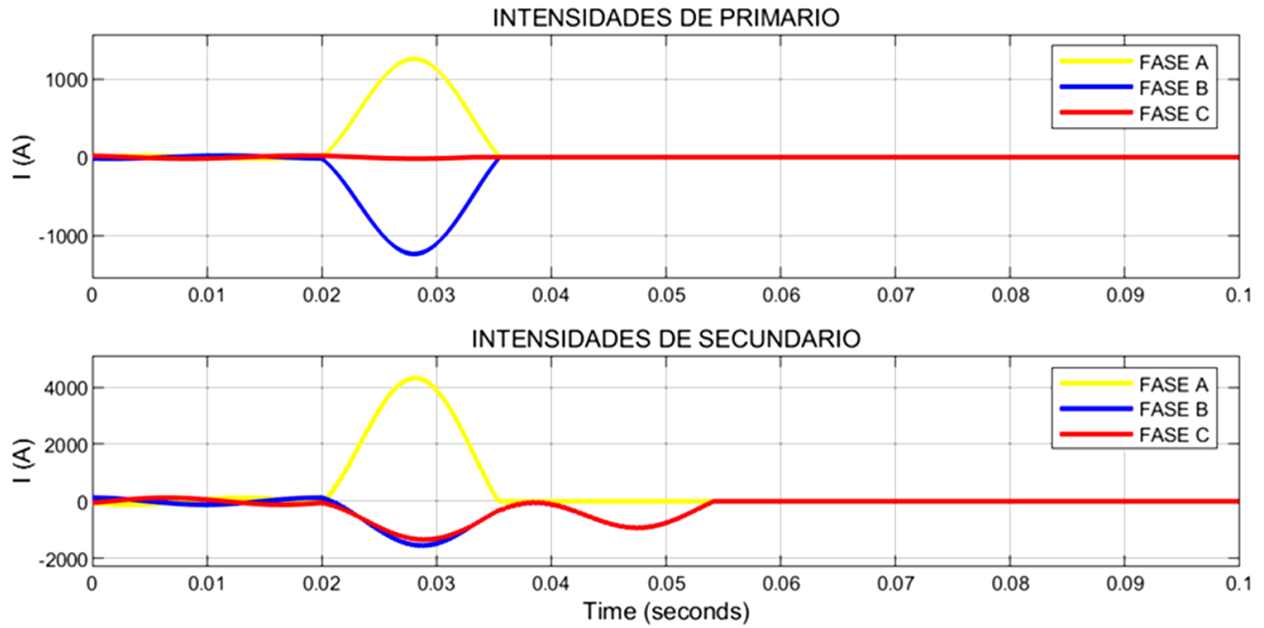


Figura 63 Falta monofásica interna en la fase A

La intensidad diferencial que surge en esta situación se muestra a continuación. Tal y como se puede apreciar, adquiere un valor elevado durante el transcurso del cortocircuito, del orden de 10 veces el TAP.

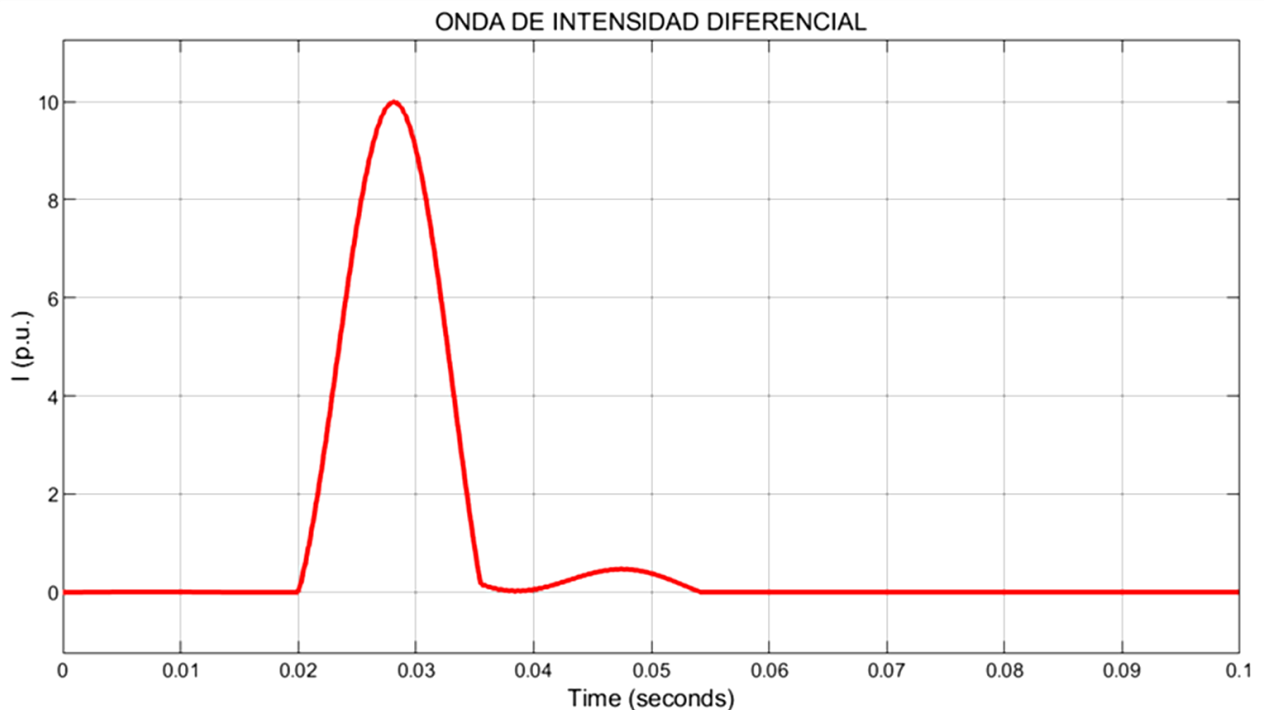


Figura 64 Onda de intensidad diferencial

Extrayendo el valor del armónico fundamental de la corriente diferencial y de la de paso se comprueba que dichas intensidades en las fases A y B toman un valor de en torno a 5 veces el TAP por lo que el disparo se activaría al ser el valor de la intensidad diferencial superior al fijado de 0,2 veces el TAP así como el valor

de la relación entre ellas es mayor a 0,3 veces el TAP. Esto indica que en el plano de disparo el punto está situado en la zona de disparo.

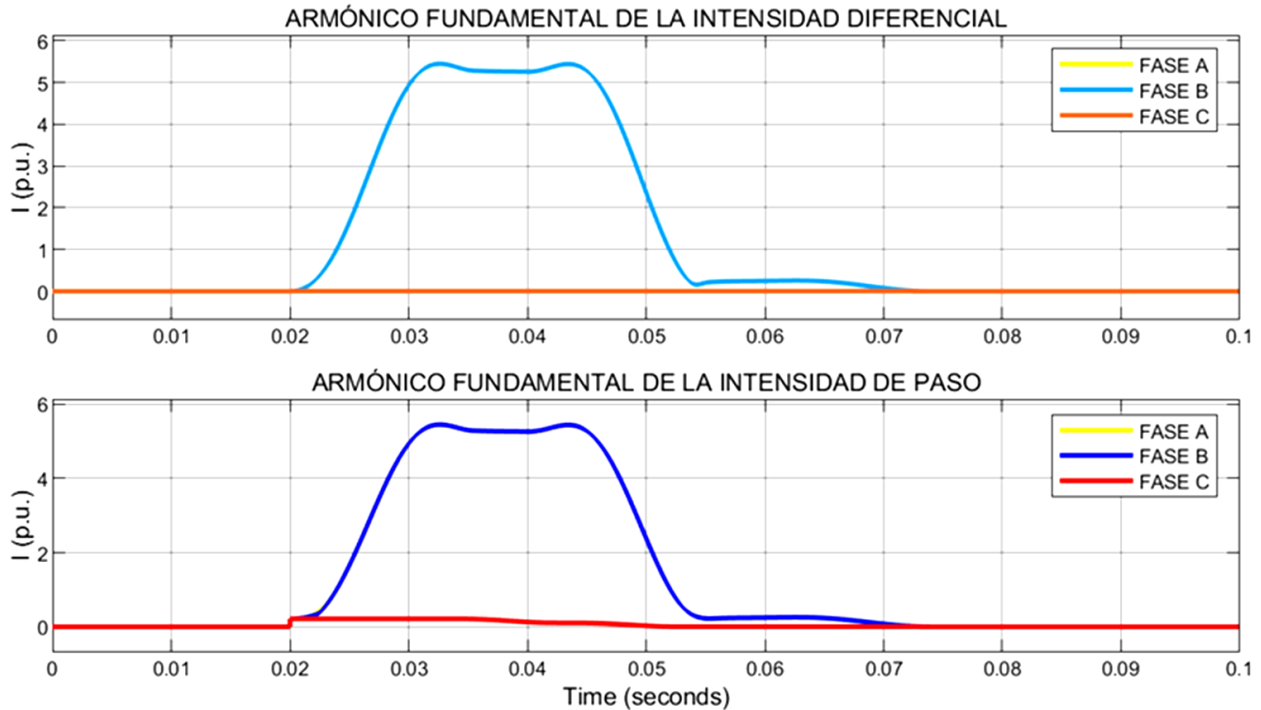


Figura 65 Armónico fundamental de la I diferencial y la I de paso

A continuación, se muestran los valores de segundo y quinto armónico de la onda de intensidad diferencial.

Durante ciertos periodos de tiempo el bloqueo por segundo y quinto armónico se activan debido a que superan el valor de la relación impuesto para cada caso

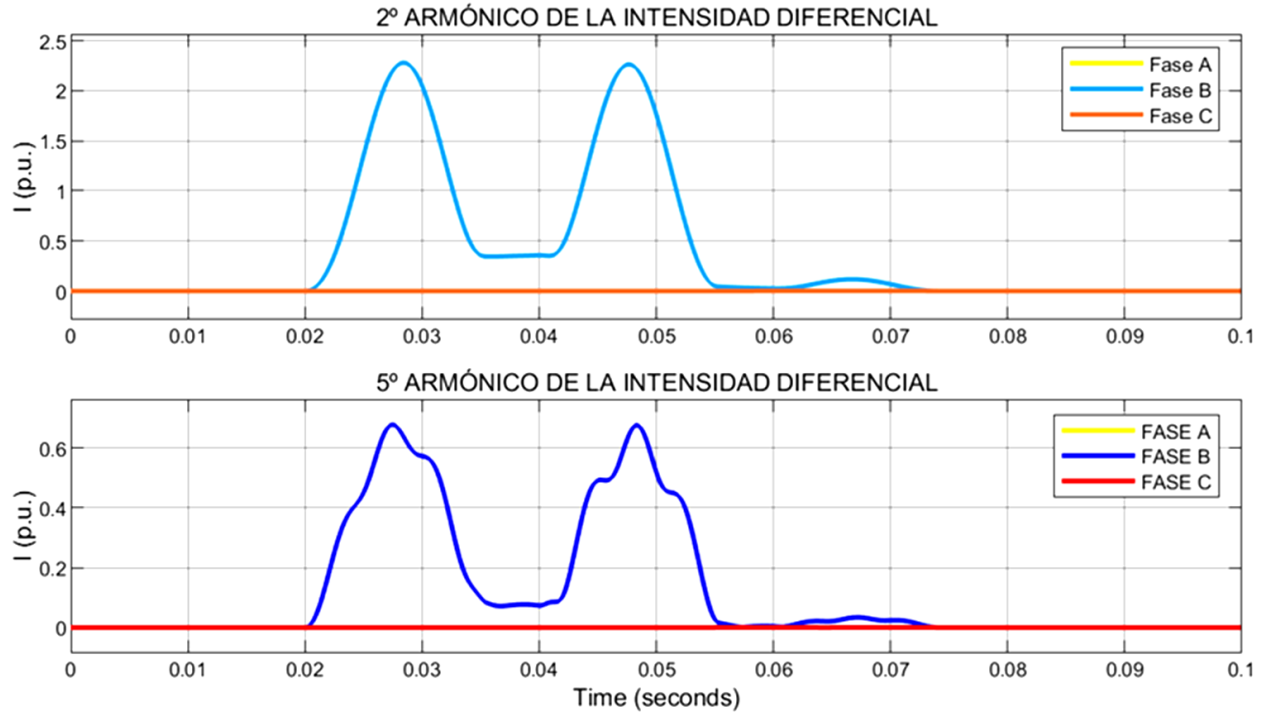


Figura 66 Segundo y quinto armónico de la intensidad diferencial

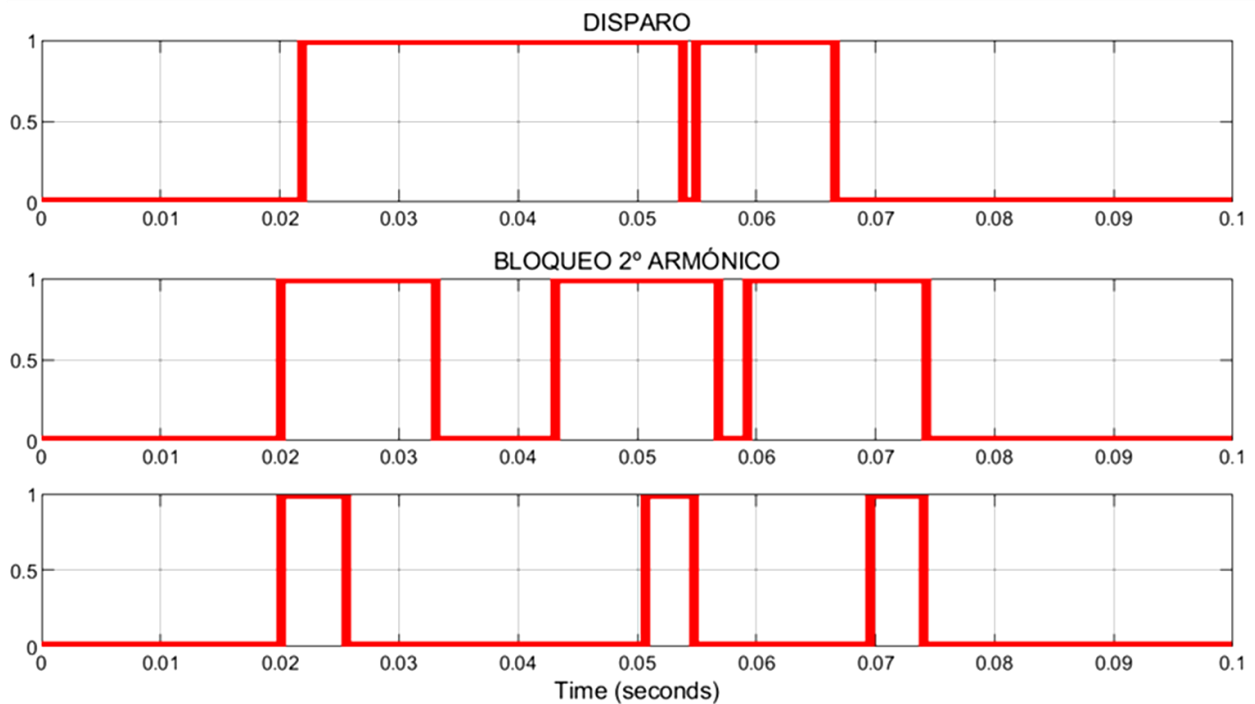


Figura 67 Funciones de disparo y bloqueo

Desde $t = 0.02$ s hasta $t = 0.03$ s aproximadamente, las 3 funciones toman el valor 1 por lo que la protección querría efectuar el disparo, pero los bloqueos se lo impiden. En el momento en el que los bloqueos cesan se envía la orden de disparo como se puede comprobar en la siguiente figura.

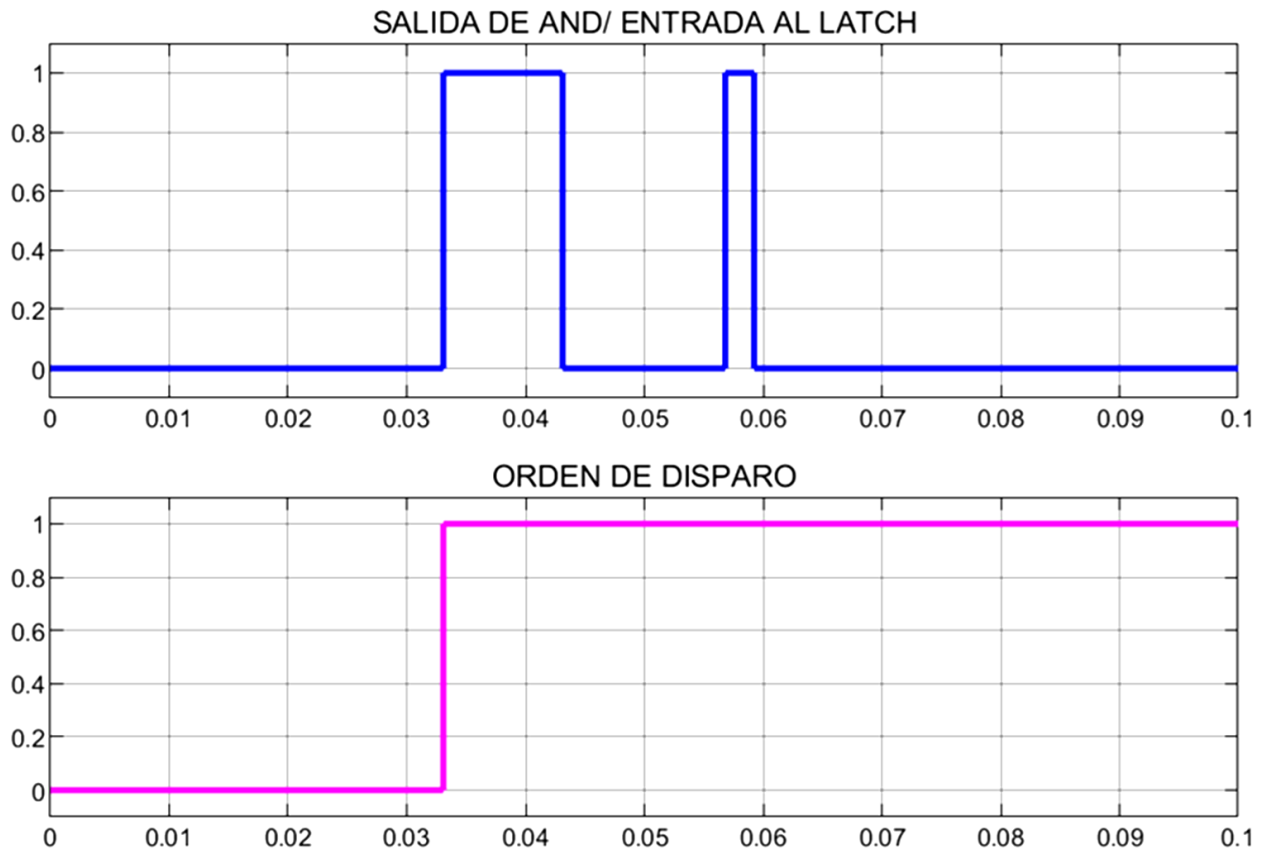


Figura 68 Orden de disparo

Se comprueba como la protección se activa para $t = 0.033$ y envía el disparo a los interruptores y, por consiguiente, abren el circuito y dejan el transformador aislado.

6.2.2 Faltas externas

6.2.2.1 Faltas externas monofásicas

Se simula ahora una falta externa monofásica en la fase A. Se va a comprobar en este apartado cómo la protección no actúa.

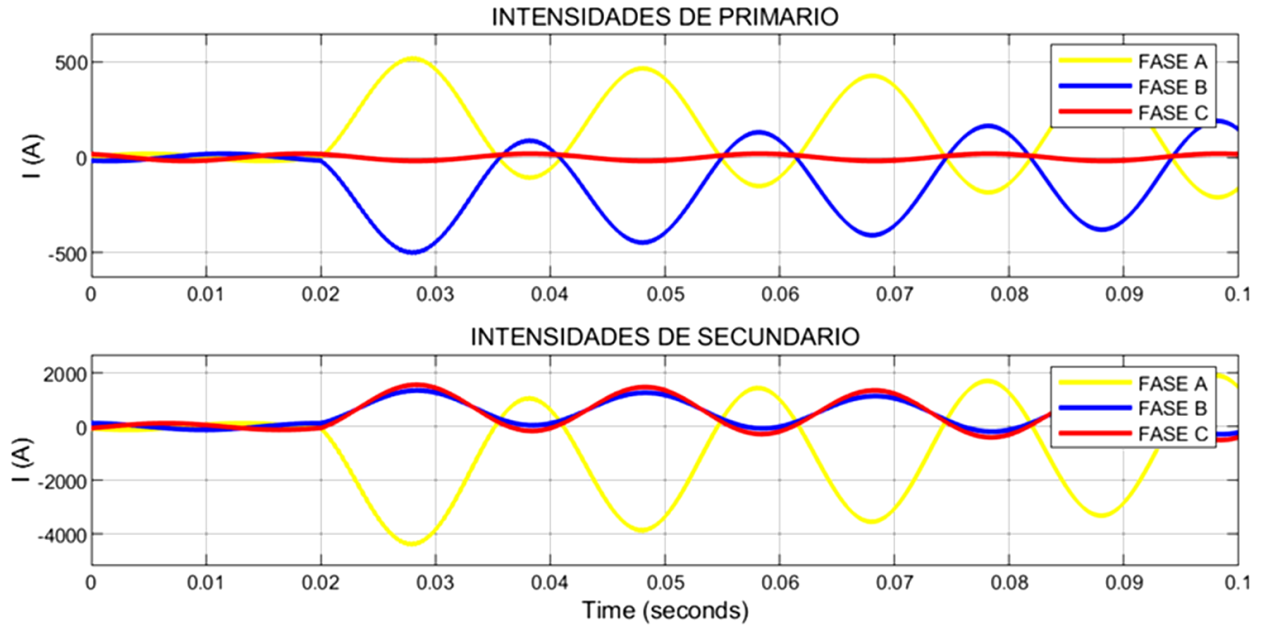


Figura 69 Intensidades de primario y secundario ante falta externa monofásica

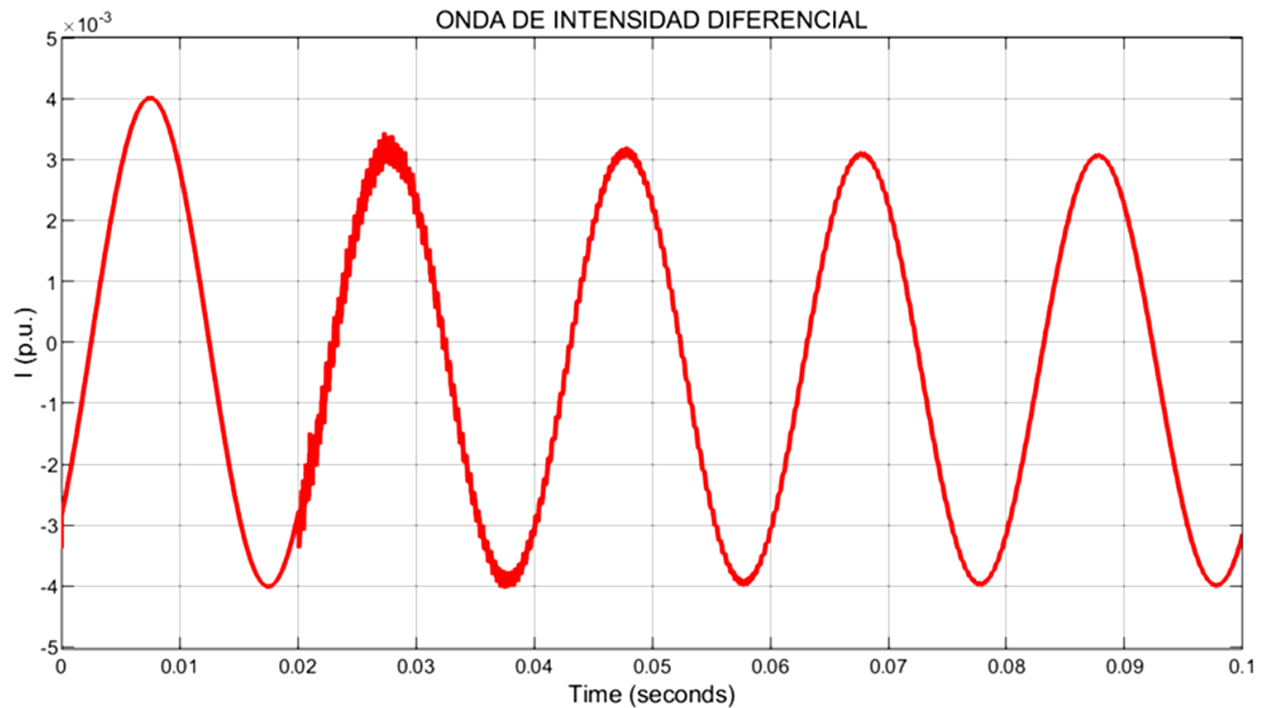


Figura 70 Onda de intensidad diferencial

La onda de intensidad diferencial toma un valor muy pequeño (10^{-3}) debido a que la falta se ha producido fuera de los elementos de medida. De esta manera, la diferencia de intensidades entrantes y salientes a los TIs únicamente se debe a la intensidad magnetizante que va por la rama de vacío del transformador.

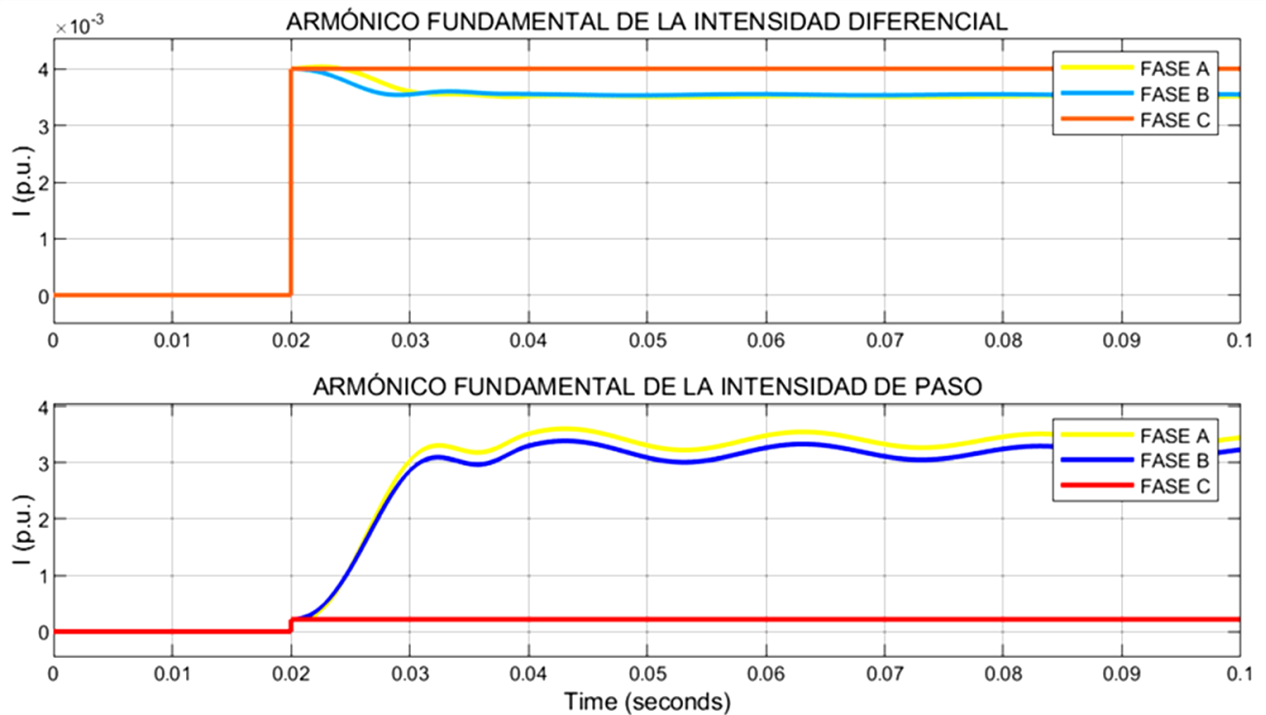


Figura 71 Armónico fundamental de la I diferencial e I de paso

Analizando el valor del armónico fundamental de la onda diferencial se comprueba que toma un valor muy pequeño mientras que el de la de paso toma valores de en torno a 3 p.u. En todo momento se sitúa en la zona del plano de no disparo.

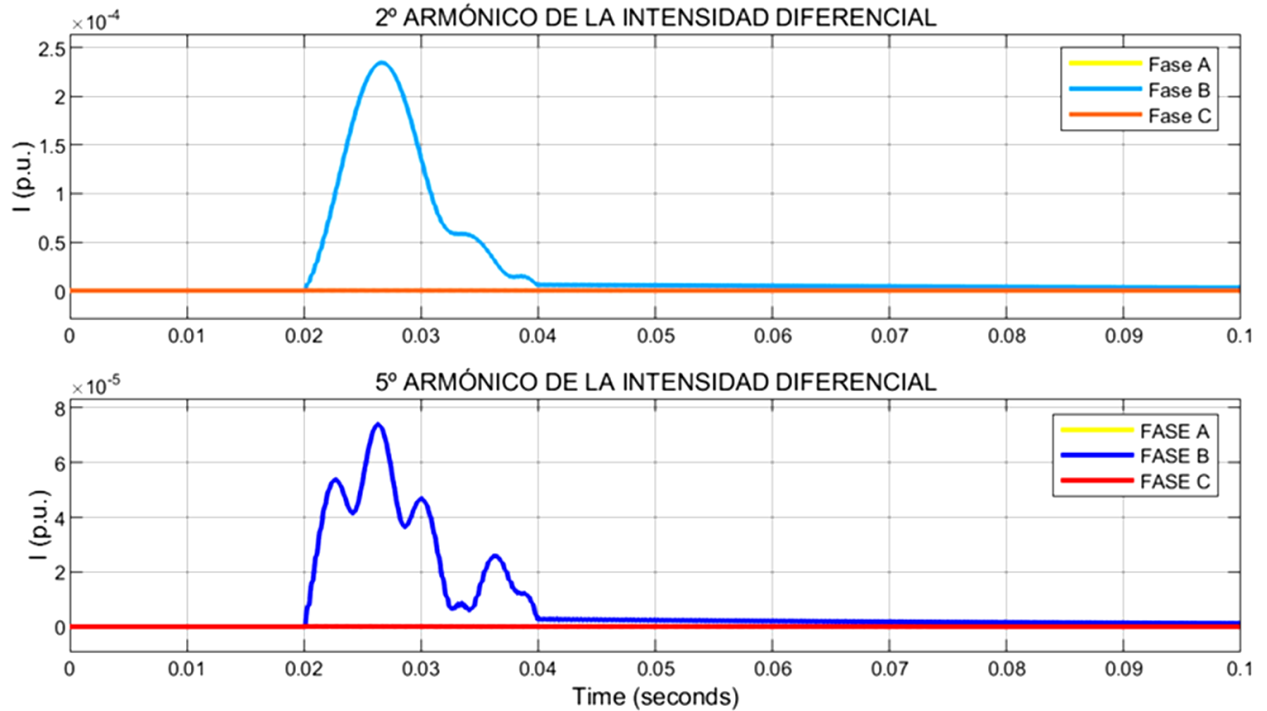


Figura 72 Segundo y quinto armónico de la I diferencial

El segundo y el quinto armónico toman valores despreciables en todo momento por lo que ni el bloqueo por segundo armónico ni por quinto se activan.

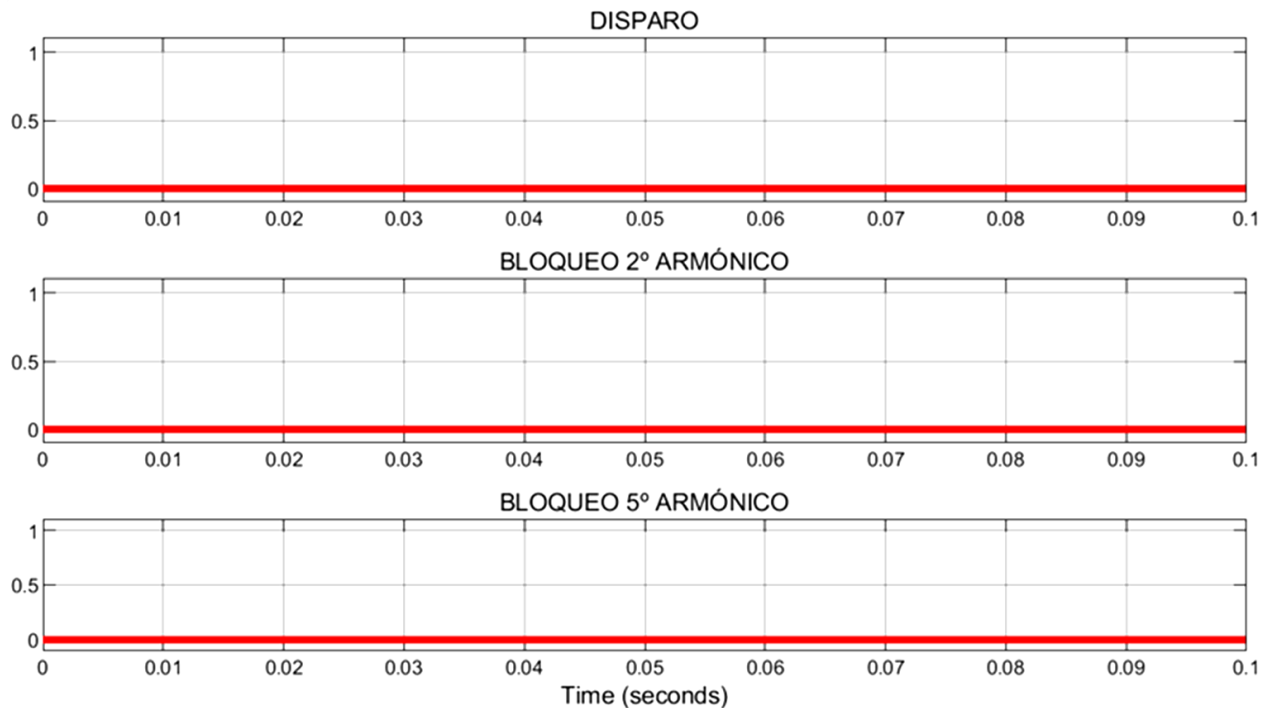


Figura 73 Funciones de disparo y bloqueo

Se comprueba como ninguna función se activa bajo estas circunstancias.

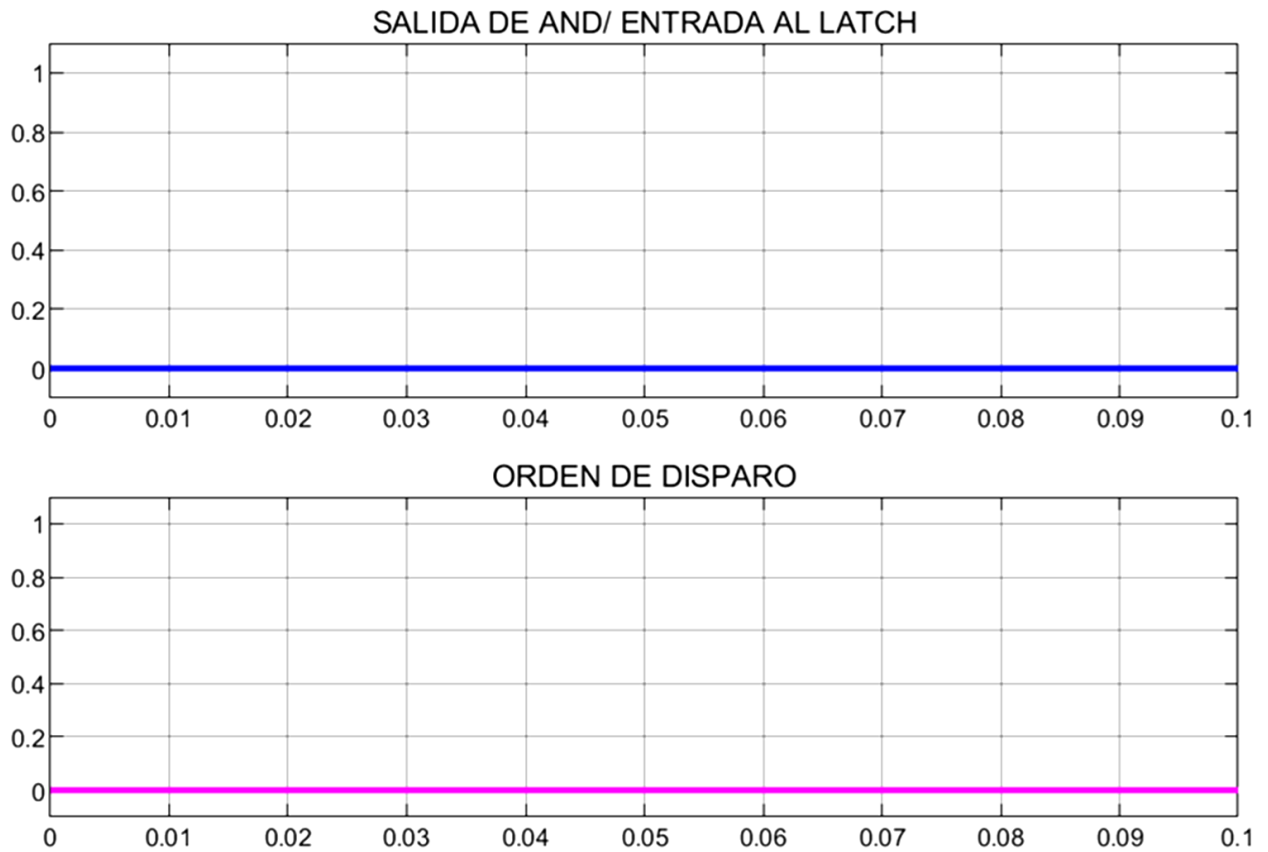


Figura 74 Orden de disparo

Finalmente, la orden de disparo no toma el valor 1 lo que equivale a que la protección diferencial no envía el disparo a los interruptores ya que la falta externa no es de su competencia.

6.2.3 Energización del transformador de potencia

Se ha simulado la conexión del transformador de potencia. Para este apartado el tiempo de simulación ha sido de 1 segundo para que se vea la tendencia de la curva de corriente diferencial de forma más clara. La onda de intensidad resultante se muestra a continuación.

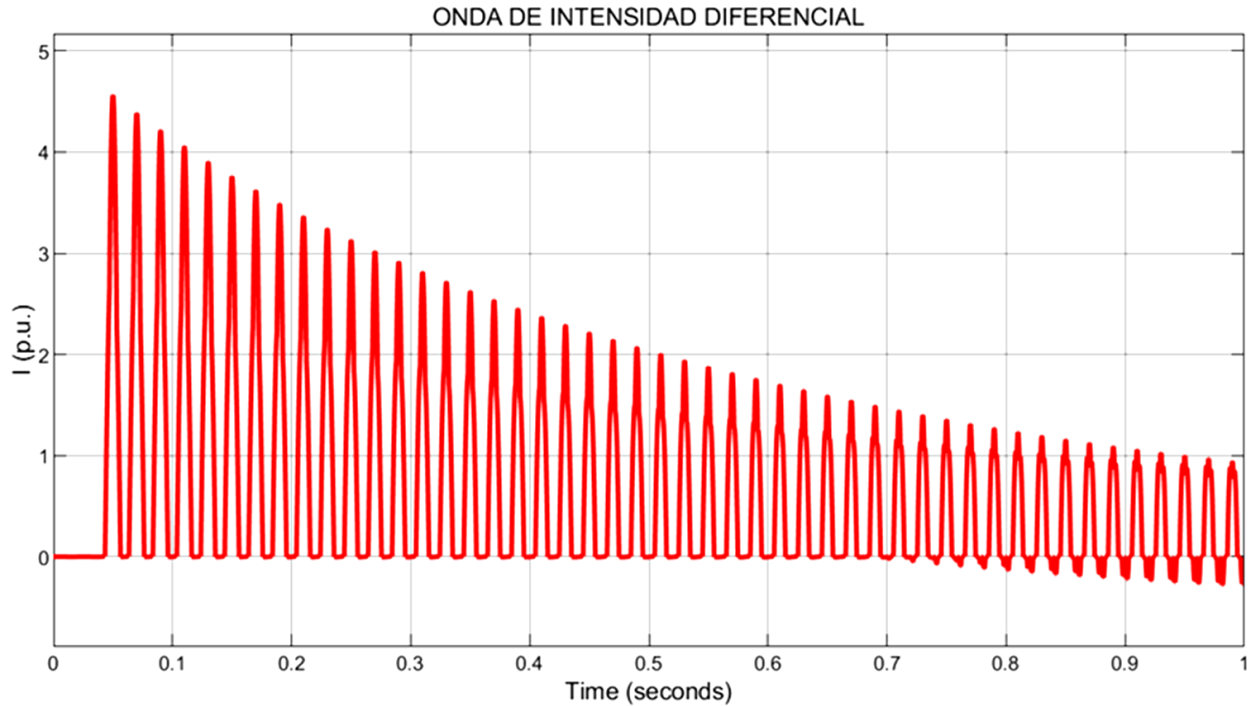


Figura 75 Onda de intensidad diferencial

Como se puede comprobar, adquiere el comportamiento descrito en el punto 5.1.3.3, asimétrico y con una tendencia exponencial negativa fruto de las resistencias internas del transformador.

Los armónicos de la onda obtenidos son los siguientes:

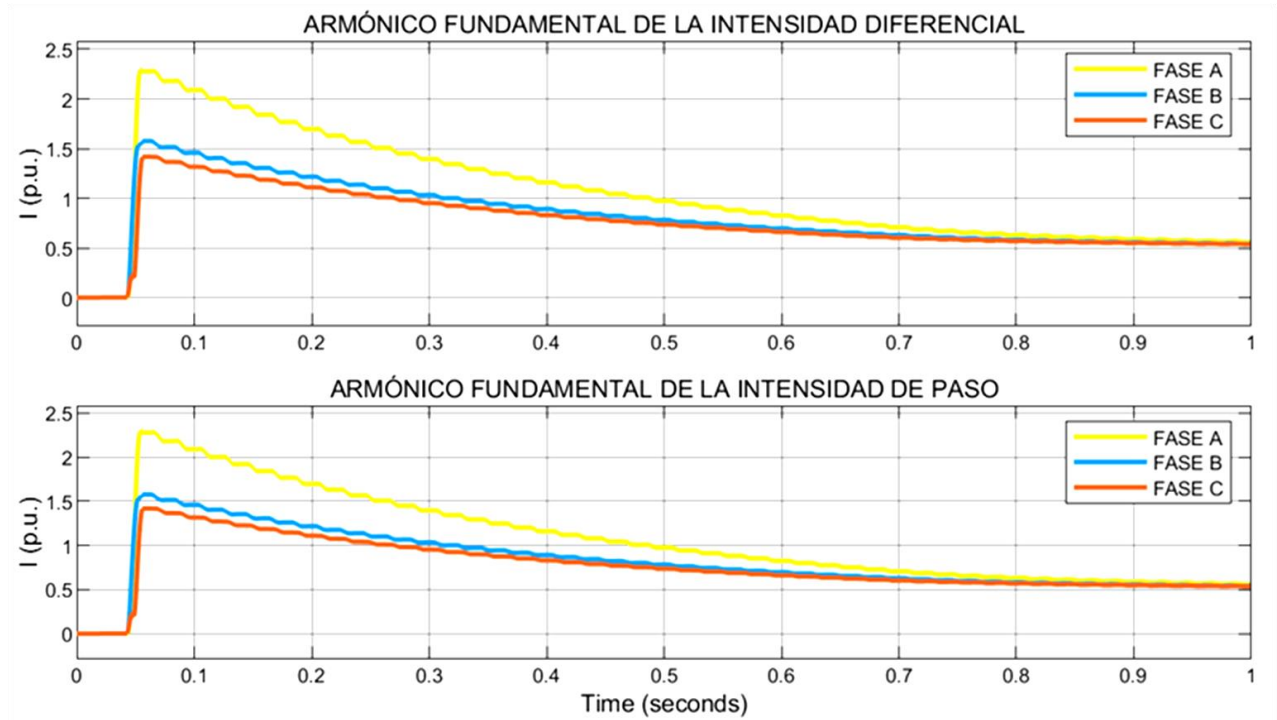


Figura 76 Armónico fundamental de la I diferencial e I de paso

La corriente diferencial supera claramente la barrera de 0.2 veces el TAP, por lo que el disparo por segundo armónico se activaría. Además, comparando la intensidad diferencial respecto a la de paso. Se pasa ahora a analizar los demás armónicos.

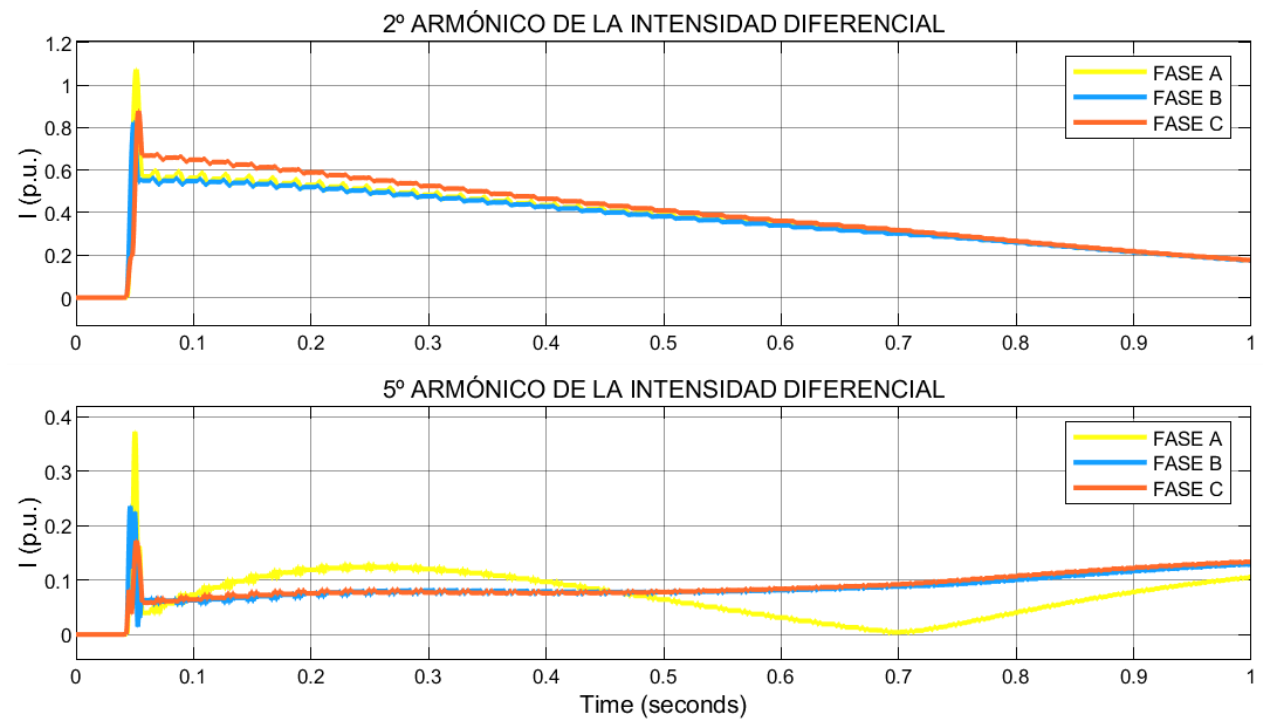


Figura 77 Segundo y quinto armónico de la intensidad diferencial

El armónico asociado a la conexión del transformador es el segundo. A la vista de los resultados, durante prácticamente todo el proceso de energización de la máquina el segundo armónico se sitúa sobre la barrera de 0.2 veces el TAP. Esta circunstancia deriva en que el bloqueo por segundo armónico se active.

El quinto armónico supera la barrera impuesta del 25% de la intensidad nominal durante un corto periodo de tiempo, pero no es transcendental en esta situación.

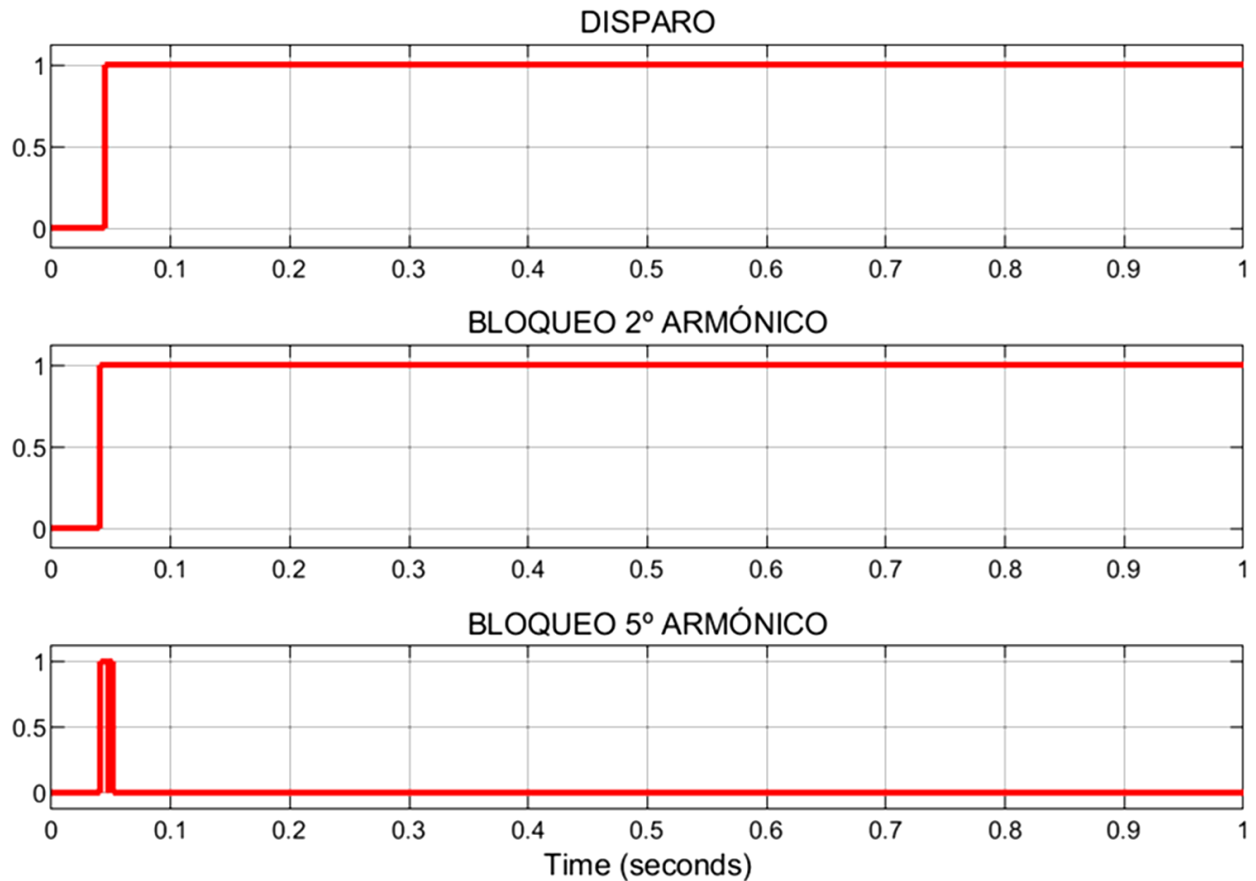


Figura 78 Activación de disparo y bloqueo2

La función de disparo toma el valor (1) de forma equivocada ya que la conexión no se trata de una falta interna. A su vez, el bloqueo por segundo armónico se activa durante todo el periodo que dura la conexión para impedir que el disparo actúe.

Estas señales se envían a la puerta AND y continúan al D-Latch dando como resultado que la protección no ejecute disparo alguno.

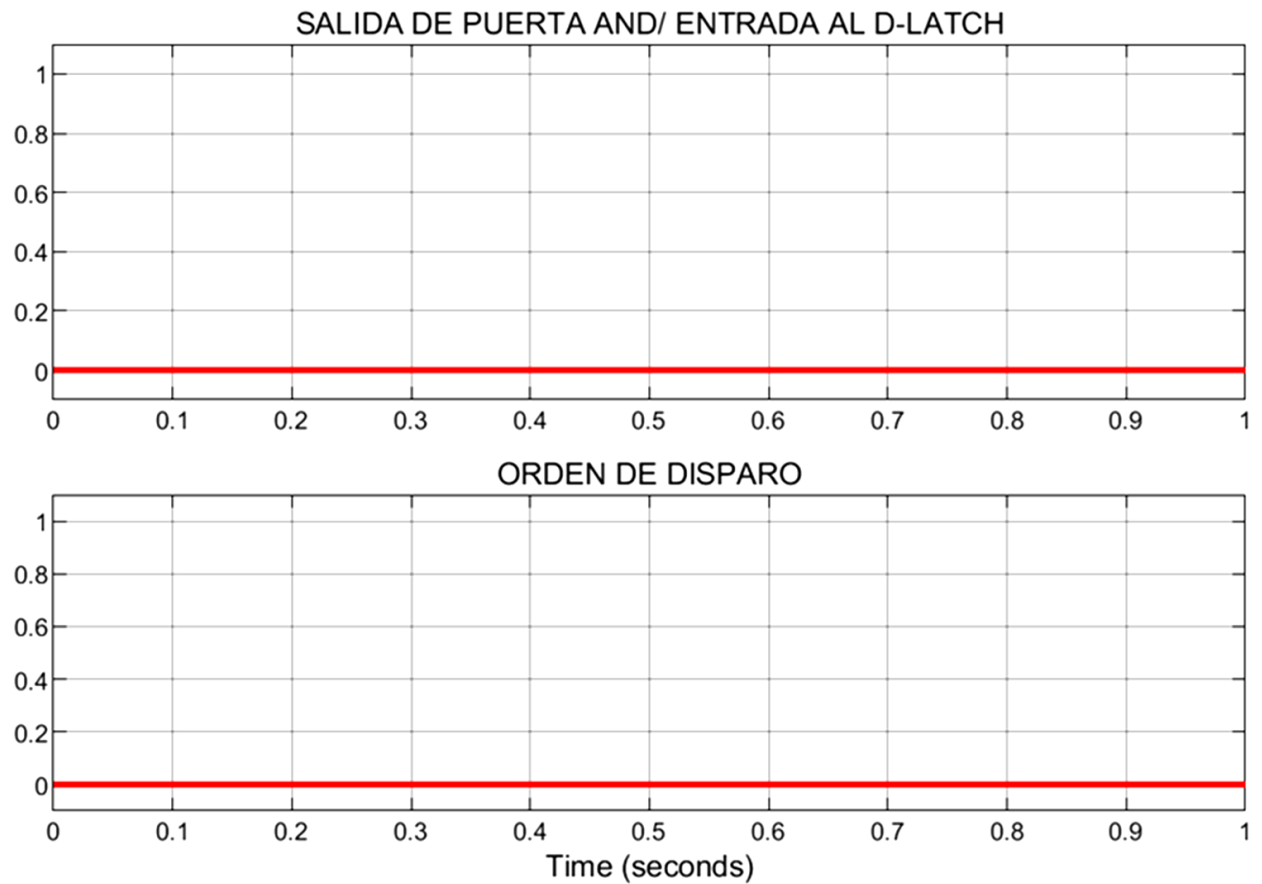


Figura 79 Orden de disparo

6.2.4 Sobreexcitación del transformador de potencia

Se ensaya ahora la protección ante una situación de sobreexcitación del transformador.

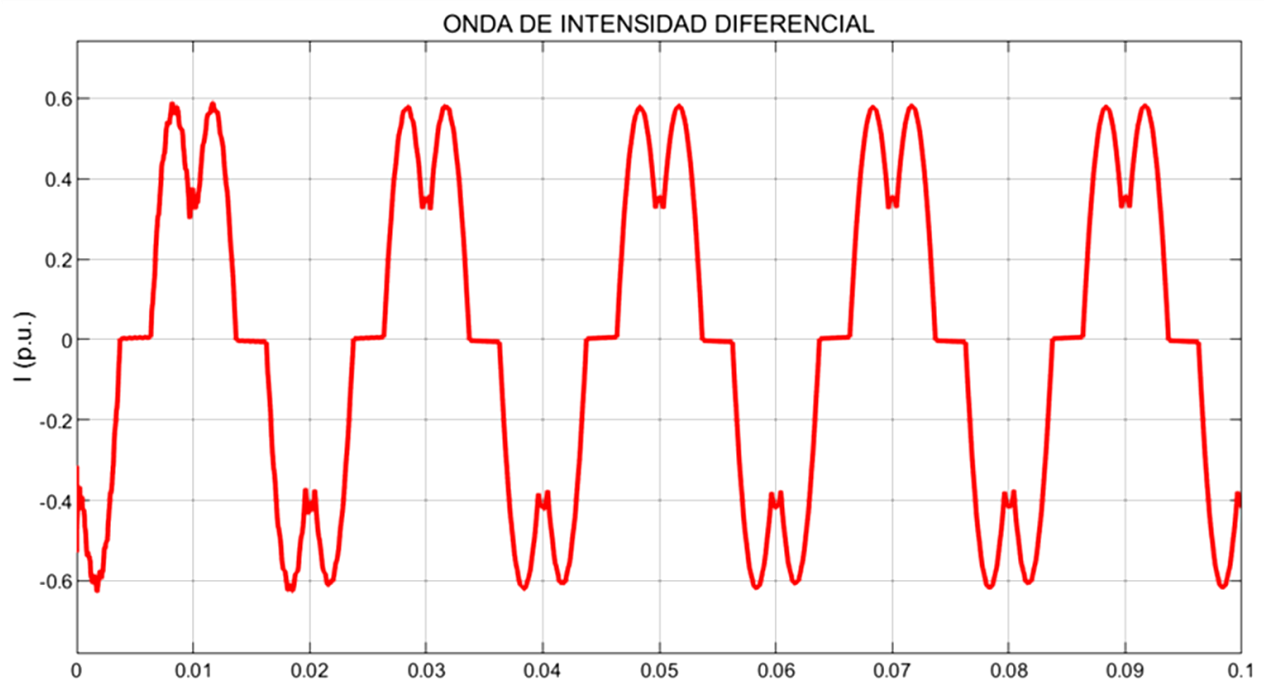


Figura 80 Onda de intensidad diferencial

La onda de intensidad que da a lugar esta circunstancia adquiere esta forma tan característica explicada en el punto 5.1.3.2. Analizando ahora los armónicos que la componen:

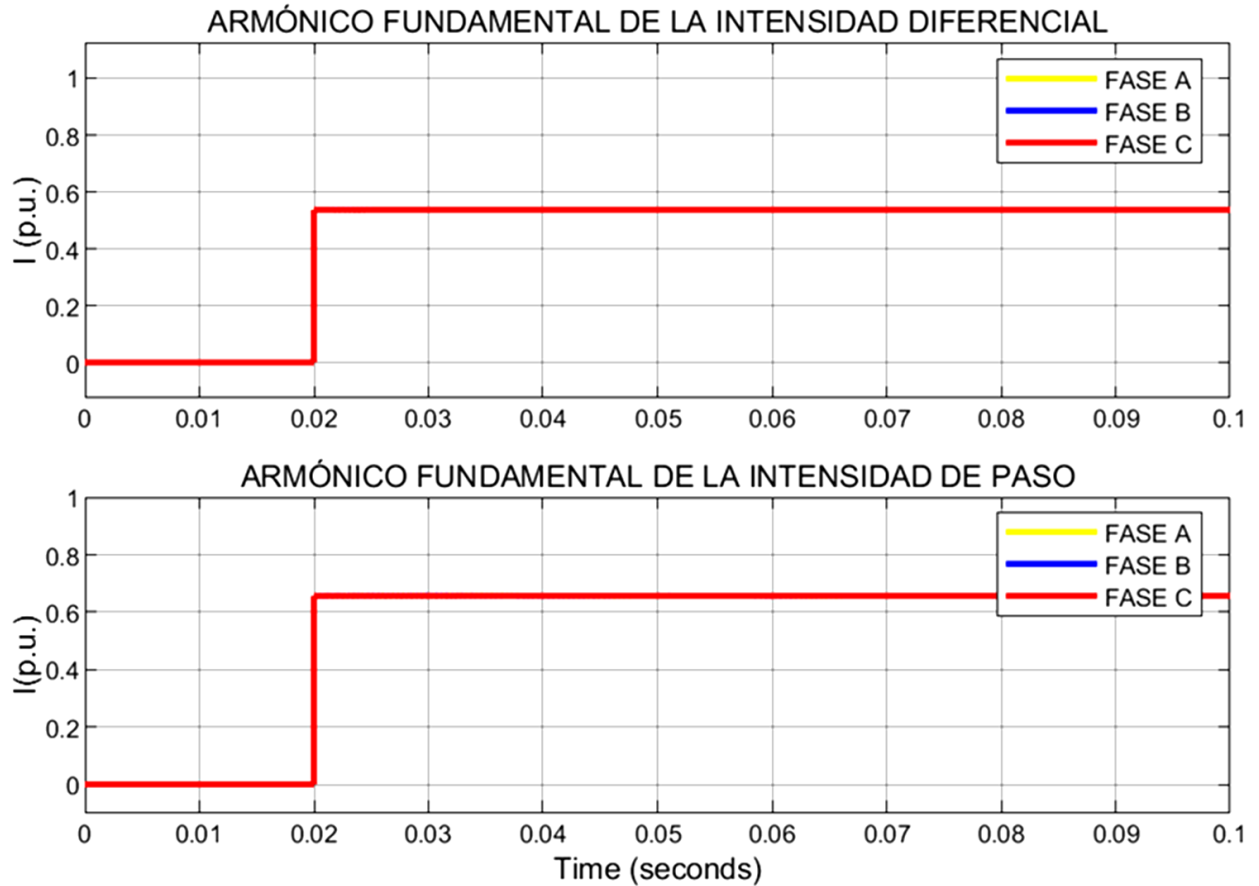


Figura 81 Armónico fundamental de la I diferencial y la I de paso

Durante todo el proceso simulado la intensidad diferencial supera el 20% del TAP así como la intensidad diferencial toma valores superiores a 0.3 veces la de paso. Esto deriva en la activación de la función disparo.

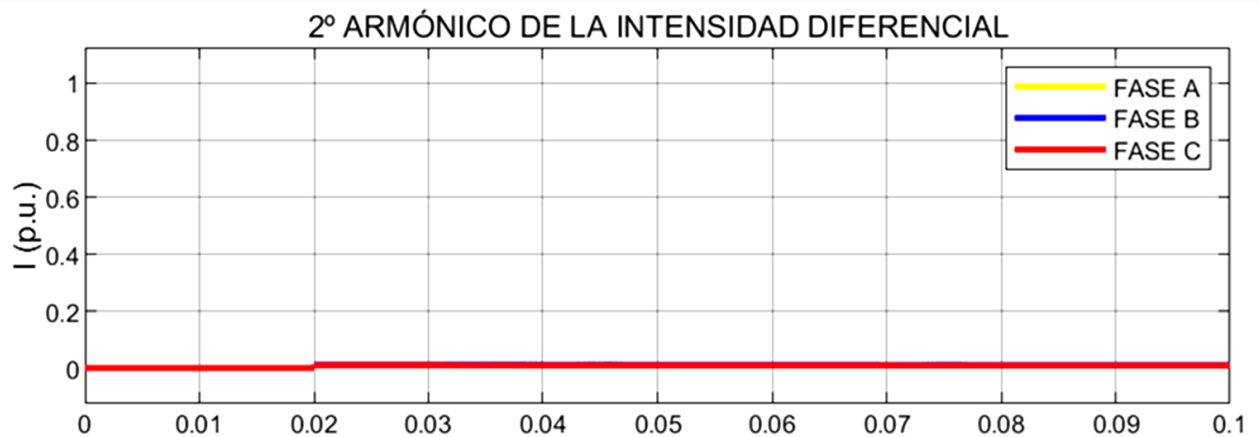


Figura 82 Segundo armónico de la intensidad diferencial

El segundo armónico de la intensidad diferencial se mantiene en valores prácticamente cercanos a cero durante toda la simulación por lo que el bloqueo por segundo armónico no actúa.

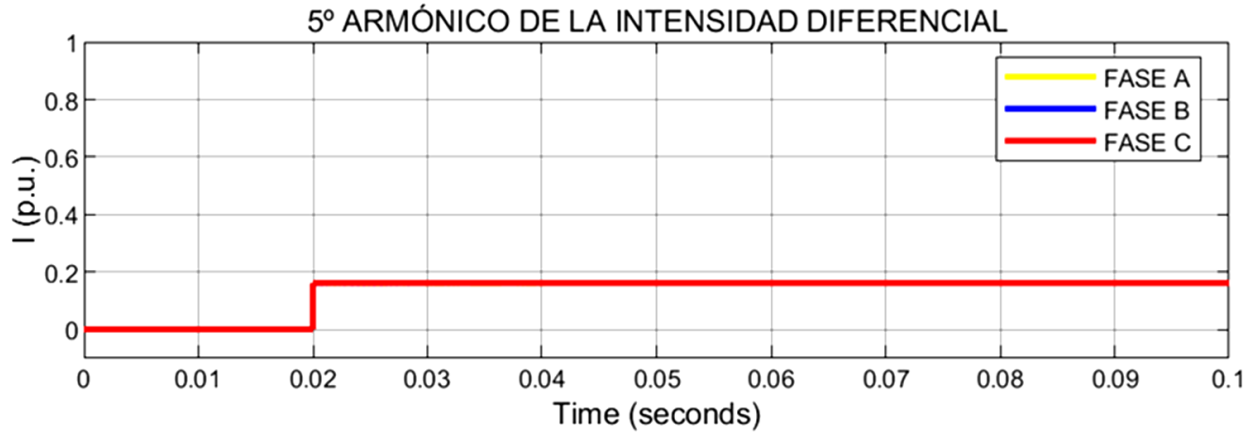


Figura 83 Quinto armónico de la intensidad diferencial

A la vista del valor del quinto armónico a lo largo de la simulación (0.18 p.u.) y su relación con el armónico fundamental de la misma cuyo valor durante este periodo es de 0.55 p.u. se puede deducir que el bloqueo por quinto armónico se va a activar. $0.18/0.55=0.327$, valor superior a 0.25 fijado por el diseñador.

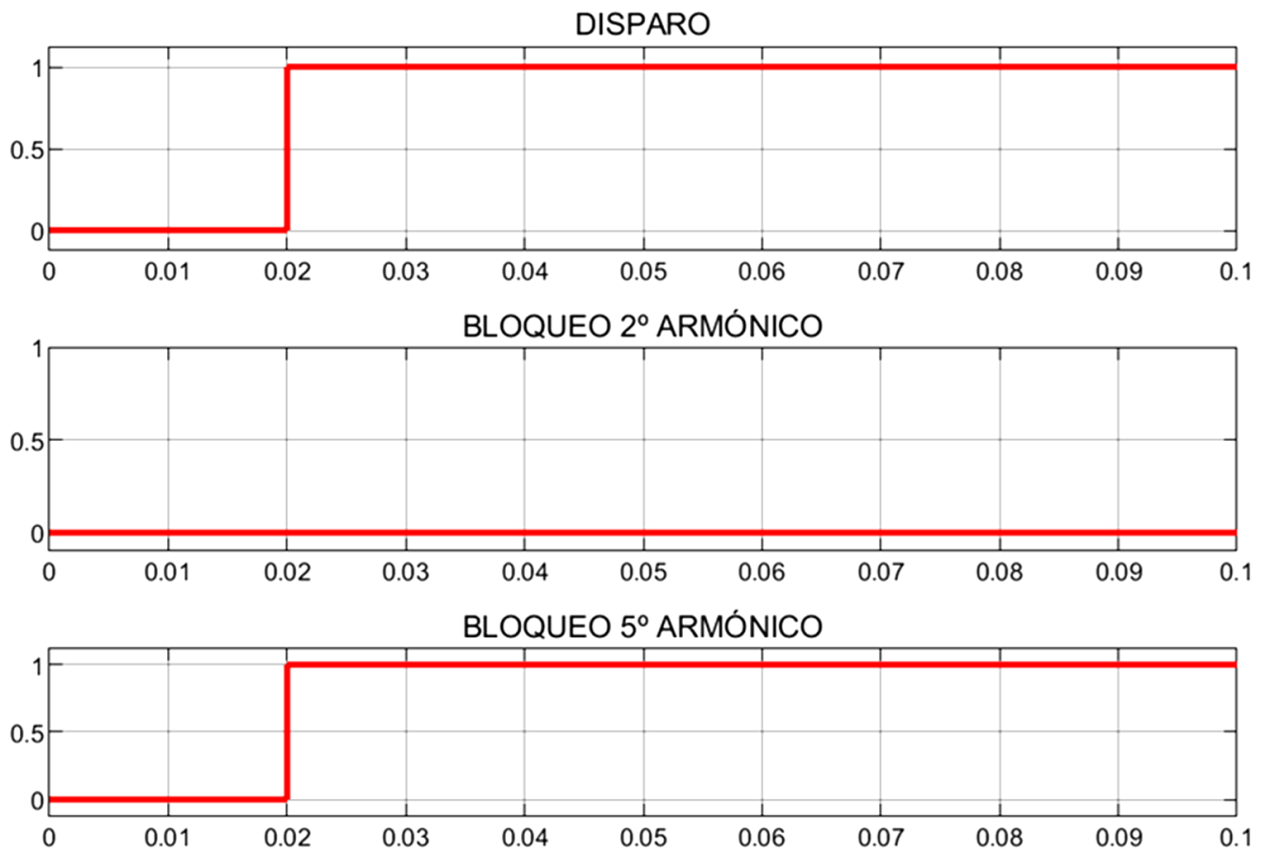


Figura 84 Activación de disparo y bloqueo 5

Tal y como era de esperar, el disparo se activa indebidamente a la vez que el bloqueo por quinto armónico hace lo propio y se activa también para evitar la orden.

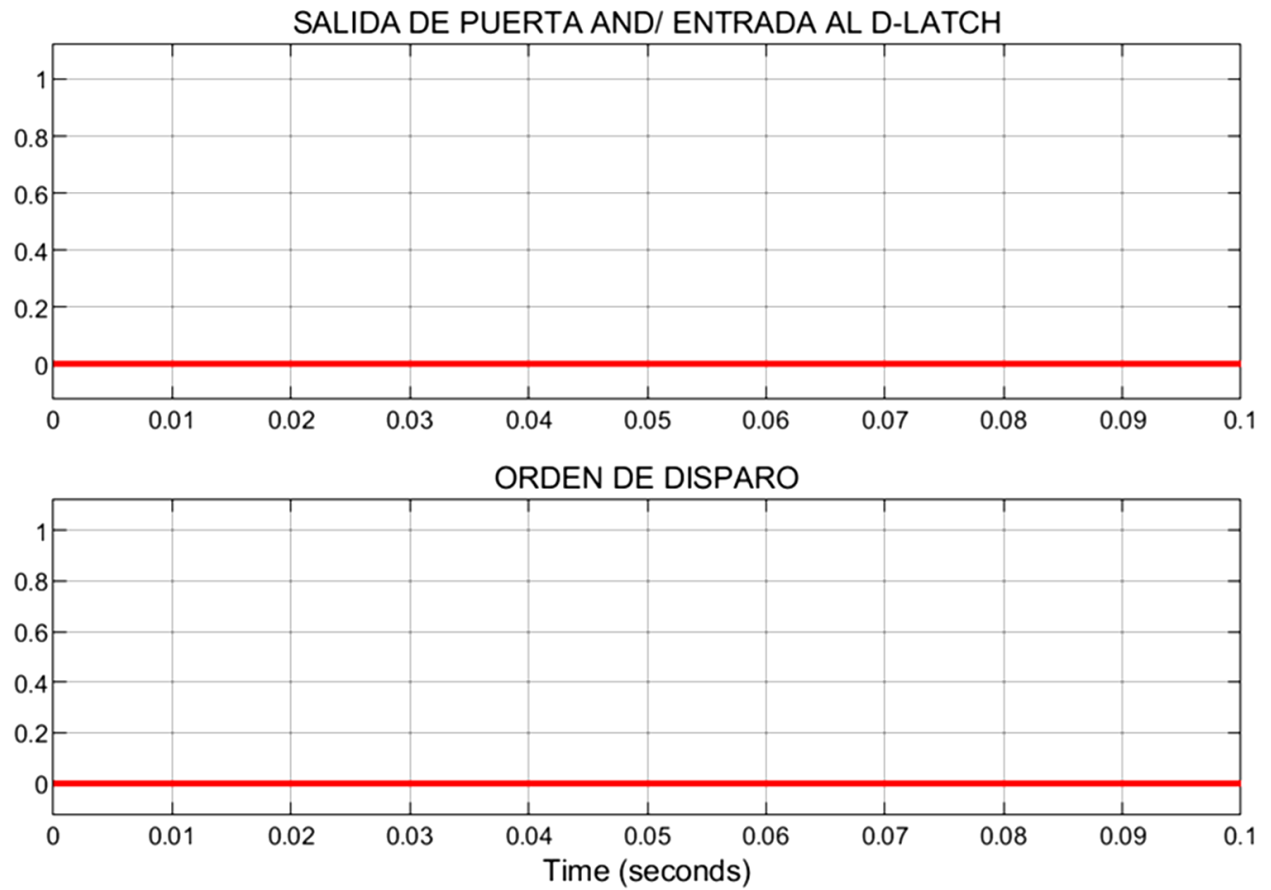


Figura 85 Orden de disparo

Se comprueba como la protección no efectúa disparo ninguno fruto del correcto ajuste de la misma.

7 DESCRIPCIÓN DE TAREAS

Las tareas llevadas a cabo para la realización de este TFG se describen en esta sección.

Este proyecto tuvo comienzo el 25 de febrero tras la vuelta del estudiante de su estancia en Eslovenia con motivo de la beca Erasmus+. El profesor presentó el trabajo a desarrollar al alumno y durante tres semanas se estuvieron reuniendo para que el estudiante recibiera las explicaciones teóricas oportunas acerca de este asunto.

Después, dio comienzo la etapa de confinamiento donde el estudiante dedicó su tiempo a analizar y asimilar los conceptos impartidos por el profesor. Asimismo, indagó en varias fuentes sobre el tema en cuestión.

Tras las vacaciones de Semana Santa, asistió de forma telemática a tres clases impartidas por el profesor en la asignatura de *Ensayo, Ajustes y coordinación de Protecciones* donde se exponían cuestiones teóricas concernientes a la protección diferencial.

Seguidamente, habiendo asimilado los fundamentos teóricos recibidos, el estudiante dio comienzo a desarrollar el modelo de la simulación. Primero de todo hubo que confeccionar el modelo de línea donde situar el transformador para aplicar sobre él la protección diferencial. A continuación, se modeló dicha protección diferencial para dar fin a la parte práctica no sin antes haber efectuado los debidos ensayos sobre ella.

En última estancia, el estudiante tuvo que redactar el trabajo en sí mismo y recibir las correcciones oportunas del profesor consiguiendo el último de los hitos que es el de la realización del documento escrito en sí.

El correspondiente listado de tareas e hitos se expone en la siguiente tabla

Tabla 5 Resumen de tareas e hitos

| Nombre de la actividad | Fecha de inicio | Duración en días | Fecha fin |
|---|-----------------|------------------|-----------|
| T1 Análisis y comprensión teórica | 25-feb | | 28-abr |
| T1.1 Tutorías con el director | 25-feb | 14 | 10-mar |
| T1.2 Búsqueda de información autónoma | 13-mar | 31 | 12-abr |
| T1.3 Asistencia a clases magistrales | 14-abr | 14 | 28-abr |
| H1 Fin de la fase teórica | 25-feb | | 28-abr |
| T2 Realización del modelo | 6-may | | 14-jun |
| T2.1 Diseño de modelo de red | 6-may | 10 | 16-may |
| T2.2 Diseño de modelo de la protección diferencial | 17-may | 17 | 3-jun |
| T2.3 Realización de ensayos | 4-jun | 10 | 14-jun |
| H2 Fin de la fase práctica | 6-may | | 14-jun |
| T3 Redacción del proyecto | 15-jun | 25 | 10-jul |
| H3 Fin del proyecto | 25-feb | | 11-jul |

7.1 Diagrama de GANTT

Se añade en este apartado la secuencia de las diferentes tareas e hitos en el correspondiente diagrama de Gantt.

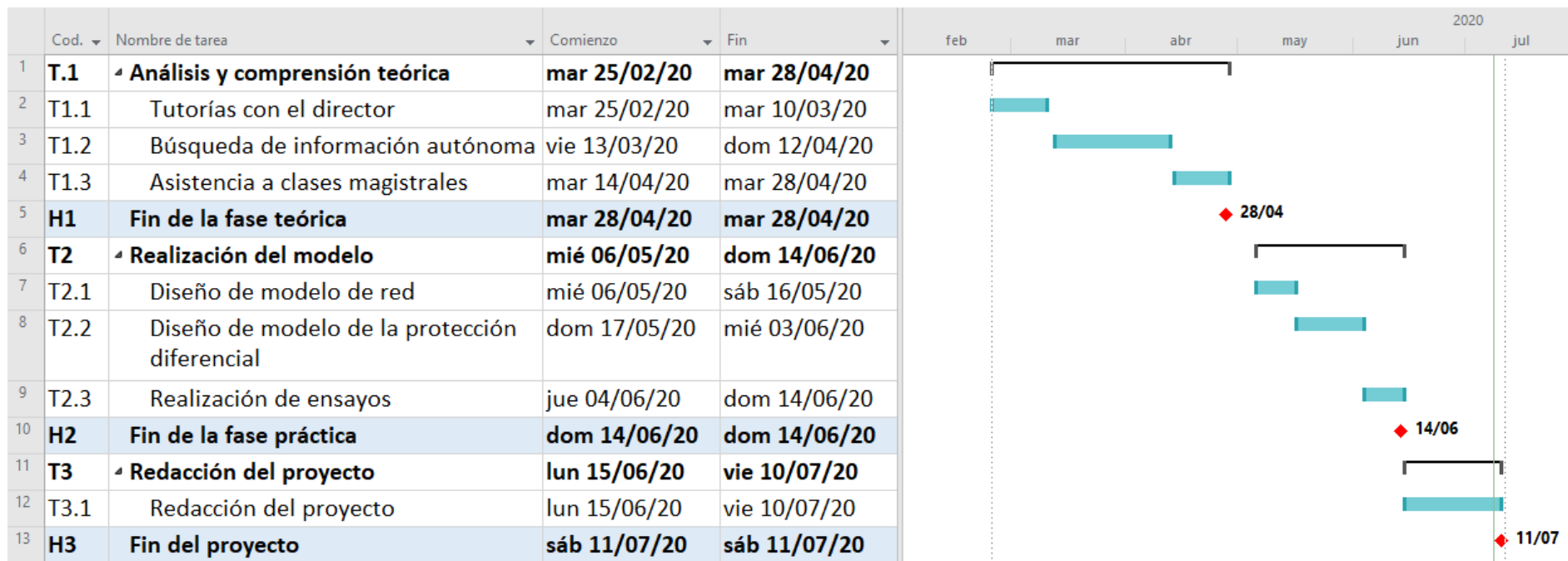


Figura 86 Diagrama de Gantt

8 ANÁLISIS DE COSTES

En esta sección se incluyen los costes derivados de la realización de este TFG. Los gastos se van a fundamentar simplemente acerca de los gastos que conlleva un informe de esta índole en el que se detalla el diseño de una protección.

8.1 Coste de personal

La primera partida de costes se asigna a los costes de empleados involucrados en esta tarea. Se resumen en 200 horas empleadas por el estudiante que toma el papel de ingeniero junior, así como 20 horas necesarias por el director del proyecto en forma de ingeniero senior.

Tabla 6 Costes de recursos humanos

| | Número de horas | Tasa horaria (€/h) | Coste total (€) |
|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Ingeniero junior | 200 | 20 | 4000 |
| Ingeniero sénior | 20 | 50 | 1000 |
| | | Total | 5000 |

8.2 Amortizaciones

Los costes debidos a la amortización de ciertos materiales con los que el autor contaba previamente a la realización de este documento son los siguientes: Un ordenador de uso personal, una licencia de Matlab y el propio software empleado para la redacción del proyecto. La vida útil de estos elementos es mayor que la duración del trabajo por lo que se podrán utilizar a posteriori.

Para el cálculo de la tasa horaria, relación entre la inversión realizada y la vida útil se han utilizado las horas laborales anuales en 1700 horas.

Tabla 7 Amortizaciones

| | Inversión (€) | Vida útil (años) | Tiempo de uso (h) | Tasa horaria (€/h) | Coste total (€) |
|------------------|---------------|------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| Ordenador | 800 | 10 | 180 | 0.05 | 8.47 |
| Licencia Matlab | 800 | 1 | 120 | 0.47 | 56.47 |
| Licencia Office | 69 | 1 | 140 | 0.04 | 5.68 |
| Licencia Project | 100 | 1 | 4 | 0.06 | 0.24 |
| | | | | Total | 70.86 |

8.3 Otros gastos

Dentro de esta partida se han incluido gastos relativos a la realización del informe que se resumen en material de oficina para este caso.

Tabla 8 Otros gastos

| | Precio (€) |
|---------------------|------------|
| Material de oficina | 10 |
| Total | 10 |

8.4 Costes indirectos

Se va a aplicado un porcentaje de costes indirectos del 3% sobre el coste total para cubrir los gastos

8.5 Presupuesto

Habiendo sumado todas las partidas mencionadas en los apartados previos este proyecto da lugar a un coste de 5233.29€

Tabla 9 Coste final

| Concepto | Coste (€) |
|-------------------------------|----------------|
| Personal | 5000 |
| Amortizaciones | 70.86 |
| Otros gastos | 10 |
| Subtotal | 5080.86 |
| Costes indirectos (3%) | 152.43 |
| Total | 5233.29 |

9 CONCLUSIONES

Para dar fin a este TFG, en esta sección se exponen las conclusiones alcanzadas.

Se concluye que la protección diferencial se trata de un método seguro y eficaz para proteger equipos de diversa índole y, en este caso, un transformador de potencia, ante faltas que experimenta el elemento de forma interna.

Por esta razón, es un método cuya característica principal podría ser la selectividad ya que debe ser capaz de distinguir el tipo de falta producida sobre el equipo y actuar o no en función del origen de la misma. Las faltas externas al elemento protegido no son competencia de esta protección.

La protección diferencial debe ser capaz de identificar a su vez situaciones peculiares que pueden acontecer en el transcurso del funcionamiento normal del transformador que está protegiendo.

- Energización del transformador
- Sobreexcitación del transformador

La discriminación por armónicos es eficiente para identificar este tipo de circunstancias, así como situaciones de faltas. En concreto, el armónico fundamental de la onda junto al segundo y quinto armónico son los principales a tener en consideración para la calibración de esta protección.

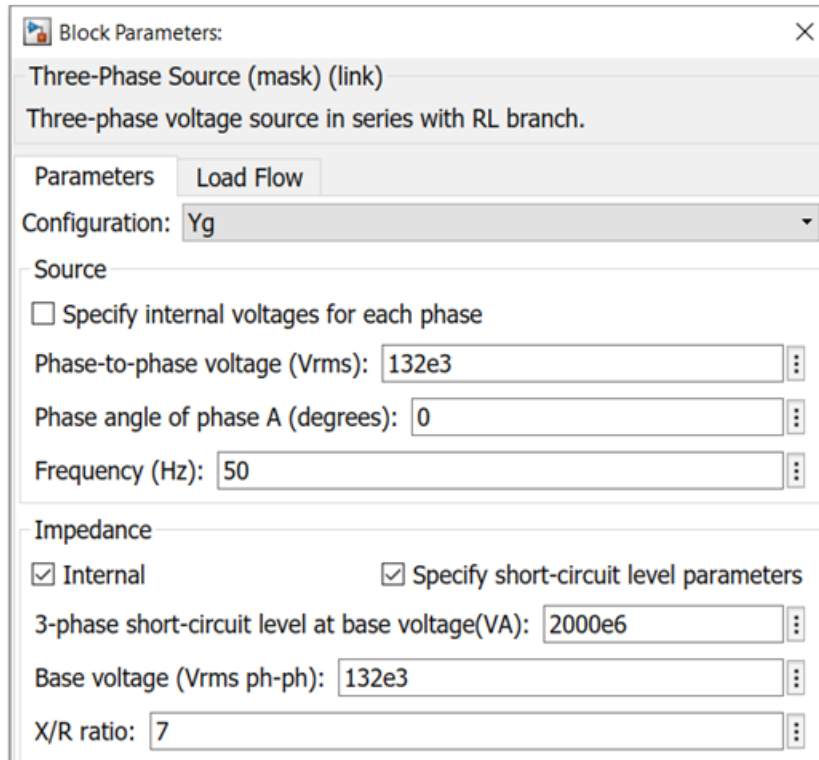
10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. F. M. M. Á. Z. G. B. V. V. Javier Mazón, Guía de autoaprendizaje de máquinas eléctricas, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [2] F. Uriondo, Protección de transformadores I, Bilbao: UPV/EHU.
- [3] F. Uriondo, Protección de transformadores II, Bilbao: UPV/EHU.
- [4] F. Uriondo, Introducción a los sistemas de protección, Bilbao: UPV/EHU.
- [5] «Ingeniería eléctrica explicada,» 11 noviembre 2009. [En línea]. Available: <http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com/2009/11/proteccion-buchholz.html>. [Último acceso: 19 06 2020].
- [6] «electricosas.blospot.com,» 3 junio 2010. [En línea]. Available: <http://electricosas.blogspot.com/2010/06/introduccion-los-cortocircuitos.html>. [Último acceso: 20 junio 2020].
- [7] E. Csanyi, «Electrical Engineering Portal,» 27 12 2017. [En línea]. Available: <https://electrical-engineering-portal.com/3-bad-conditions-false-differential-current-in-power-transformer>. [Último acceso: 15 06 2020].
- [8] Red eléctrica, Endesa Distribución, Endesa Generación, Gesa Generación, Red Eléctrica de España, Unelco Generación, «CRITERIOS GENERALES DE PROTECCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS INSULARES Y EXTRAPENINSULARES,» Diciembre 2005.
- [9] F. T. T. V. A. A. José Dolores Juárez Cervantes, «PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE GRAN POTENCIA CON RELEVADORES DE PORCENTAJE DIGITALES, PARTE I: Aspectos conceptuales,» México, 2014.
- [10] Schneider Electric, «Publicación Técnica Schneider: PT-071,» Barcelona, Mayo 2003.
- [11] J. Figueroa, «Protección de sistemas eléctricos,» 2004.
- [12] «All about circuits,» [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-10/d-latch/>. [Último acceso: 22 06 2020].

11 ANEXOS

11.1 ANEXO I. Especificaciones del modelo simulado

Se añaden en este anexo al proyecto los *block parameters* con las variables que conforman el modelo diseñado.



Block Parameters: ×

Three-Phase Source (mask) (link)

Three-phase voltage source in series with RL branch.

Parameters Load Flow

Configuration: Yg

Source

☐ Specify internal voltages for each phase

Phase-to-phase voltage (Vrms): 132e3

Phase angle of phase A (degrees): 0

Frequency (Hz): 50

Impedance


☒ Internal ☒ Specify short-circuit level parameters

3-phase short-circuit level at base voltage(VA): 2000e6

Base voltage (Vrms ph-ph): 132e3

X/R ratio: 7

Figura 87 Fuente de tensión trifásica


 Block Parameters: Three-Phase PI Section Line
 ✕

This block models a three-phase transmission line with a single PI section. The model consists of one set of RL series elements connected between input and output terminals and two sets of shunt capacitances lumped at both ends of the line.

RLC elements are computed using hyperbolic corrections yielding an "exact" representation in positive- and zero-sequence at specified frequency only.

To obtain an extended frequency response, connect several PI section blocks in cascade or use a Distributed Parameter line.

Parameters

Frequency used for rlc specification (Hz):

Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [r1 r0]:

Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [l1 l0]:

Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [c1 c0]:

Line length (km):

Figura 88 Impedancias fuente

Block Parameters: ret

Three-Phase Breaker (mask) (link)

Implements a three-phase circuit breaker. When the external switching time mode is selected, a Simulink logical signal is used to control the breaker operation.

Parameters

Initial status: closed

Switching of:

☒ Phase A ☒ Phase B ☒ Phase C

Switching times (s): /50 10] ☒ External

Breaker resistance Ron (Ohm): 0.01

Snubber resistance Rs (Ohm): 1e6

Snubber capacitance Cs (F): inf

Measurements: None

Figura 89 Interruptor

Block Parameters: Three-Phase Transformer (Two Windings)

Three-Phase Transformer (Two Windings) (mask) (link)

This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Winding 1 connection (ABC terminals):

Delta (D1)

Winding 2 connection (abc terminals):

Yn

Core

Type: Three single-phase transformers

☒ Simulate saturation

☐ Simulate hysteresis

☐ Specify initial fluxes

Measurements

None

Figura 90 Transformador trifásico

Block Parameters: Three-Phase V-I Measurement2

Three-Phase VI Measurement (mask) (link)

Ideal three-phase voltage and current measurements.

The block can output the voltages and currents in per unit values or in volts and amperes.

Parameters

Voltage measurement

Current measurement

☒ Use a label

Signal label (use a From block to collect this signal)

☐ Currents in pu

Output signals in:

Figura 91 Medidor de intensidad trifásico

Block Parameters: Distributed Parameters Line

Distributed Parameters Line (mask) (link)

Implements a N-phases distributed parameter line model. The rlc parameters are specified by [NxN] matrices.

To model a two-, three-, or a six-phase symmetrical line you can either specify complete [NxN] matrices or simply enter sequence parameters vectors: the positive and zero sequence parameters for a two-phase or three-phase transposed line, plus the mutual zero-sequence for a six-phase transposed line (2 coupled 3-phase lines).

Parameters

Number of phases [N]:

Frequency used for rlc specification (Hz):

Resistance per unit length (Ohms/km) [NxN matrix] or [r1 r0 r0m]:

Inductance per unit length (H/km) [NxN matrix] or [l1 l0 l0m]:

Capacitance per unit length (F/km) [NxN matrix] or [c1 c0 c0m]:

Line length (km):

Measurements

Figura 92 Impedancia línea

Block Parameters: Three-Phase Fault1

Three-Phase Fault (mask) (link)

Implements a fault (short-circuit) between any phase and the ground. When the external switching time mode is selected, a Simulink logical signal is used to control the fault operation.

Parameters

Initial status: 0

Fault between:

☐ Phase A ☐ Phase B ☐ Phase C ☐ Ground

Switching times (s): [1/50 5/50] ☐ External

Fault resistance R_{on} (Ohm): 0.001

Ground resistance R_g (Ohm): 0.001

Snubber resistance R_s (Ohm): 1e6

Snubber capacitance C_s (F): inf

Measurements: None

Figura 93 Generador de faltas

11.2 ANEXO II. Faltas ensayadas

Se adjuntan en este anexo las gráficas correspondientes a la actuación de la protección diferencial ante las faltas internas y externas de carácter:

- Falta bifásica
- Falta bifásica a tierra
- Falta trifásica

11.2.1 Faltas internas

11.2.1.1 Falta interna bifásica entre fases A y B

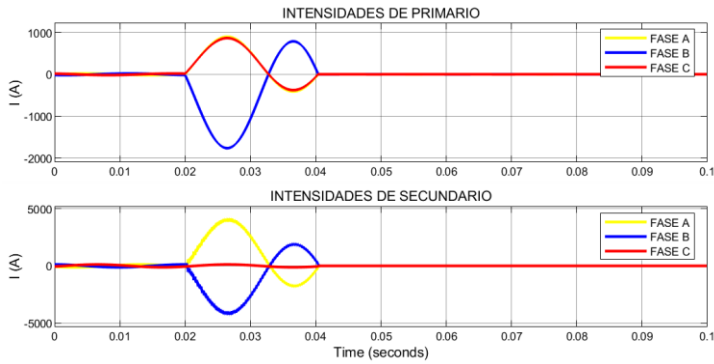


Figura 94 Falta interna bifásica en fases A y B

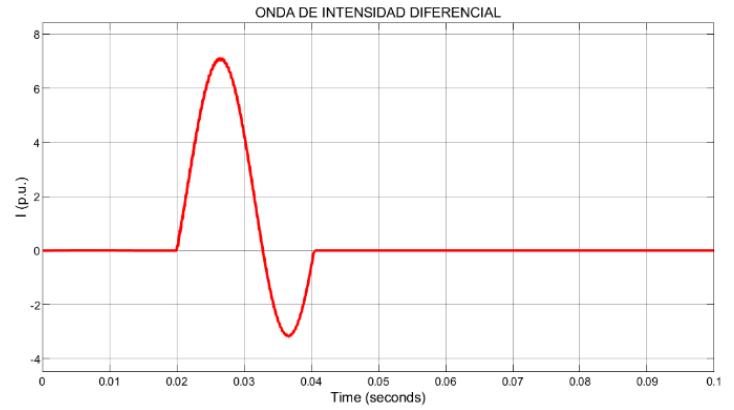


Figura 95 Onda de intensidad diferencial

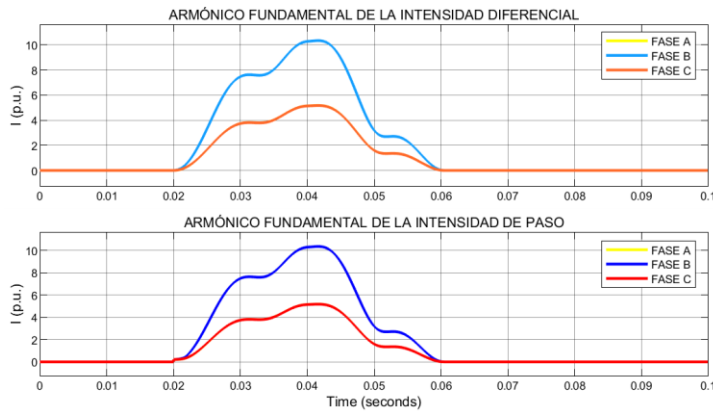


Figura 96 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso

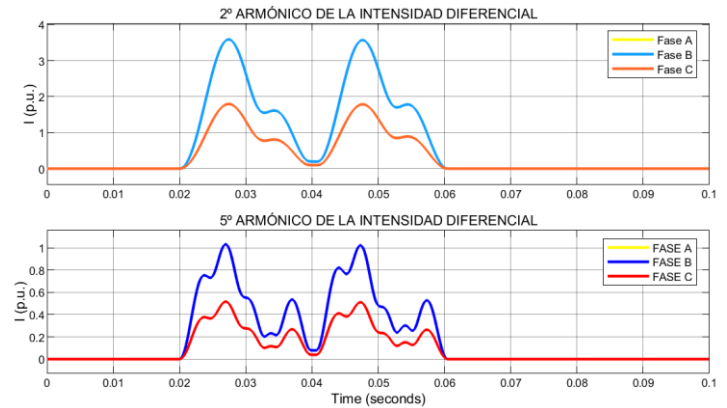


Figura 97 Segundo y quinto armónico de I diferencial

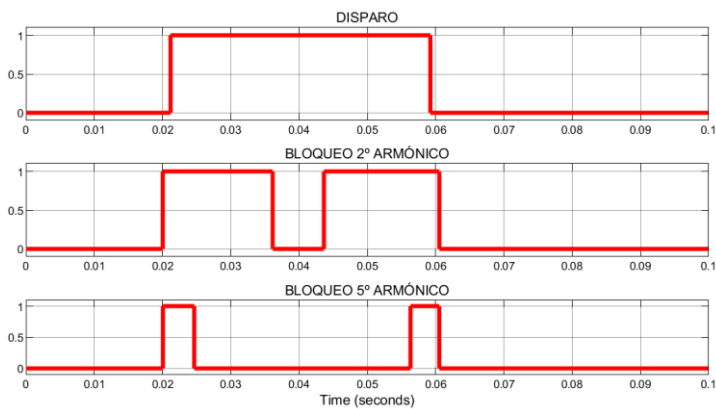


Figura 98 Funciones de disparo y bloqueo

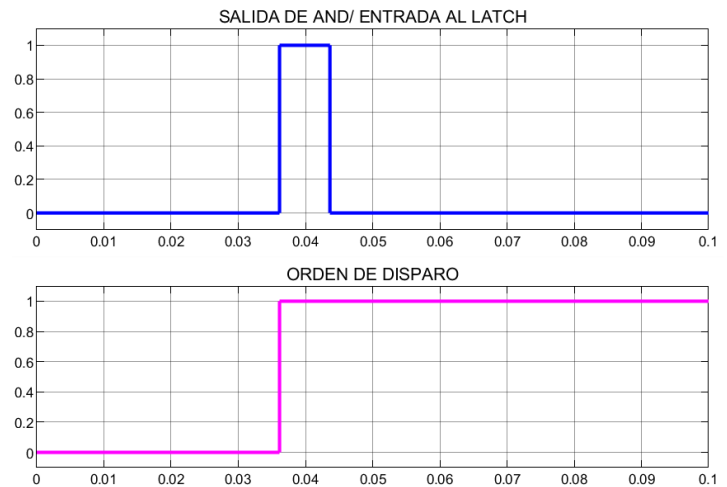


Figura 99 Orden de disparo

11.2.1.2 Falta interna bifásica a tierra entre fases A y B

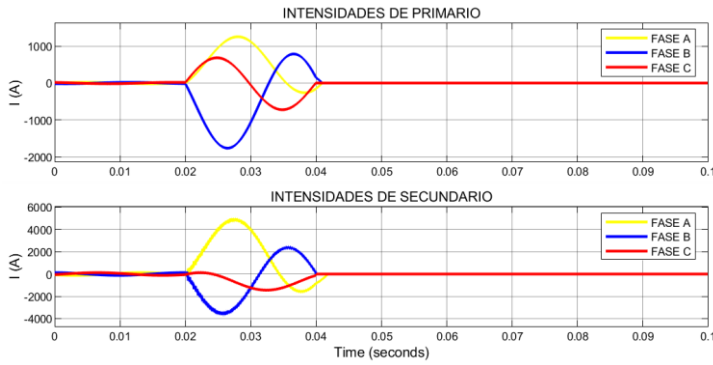


Figura 100 Falta interna bifásica a tierra entre fases A y B

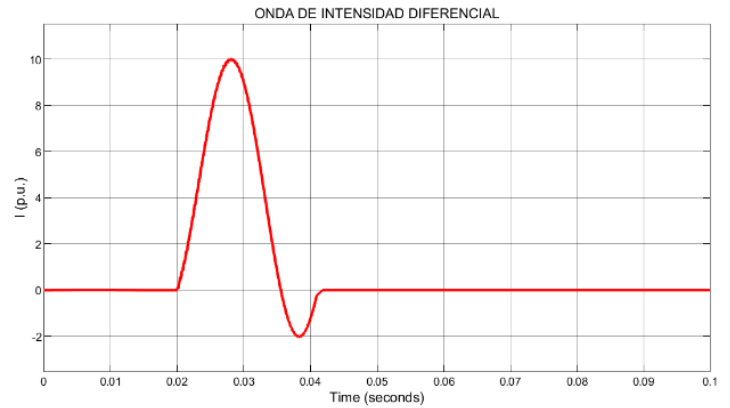


Figura 101 Onda de intensidad diferencial

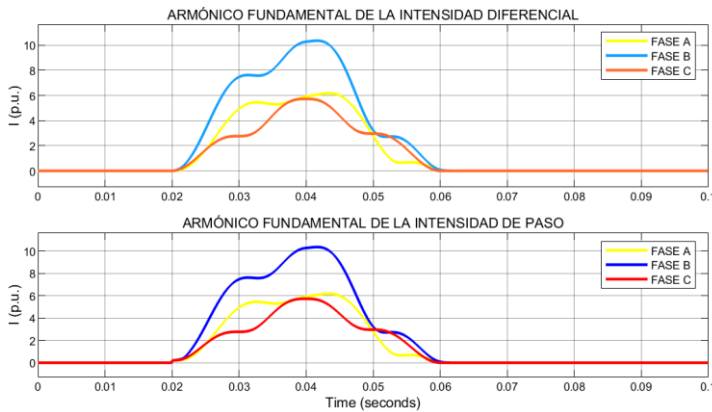


Figura 102 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso

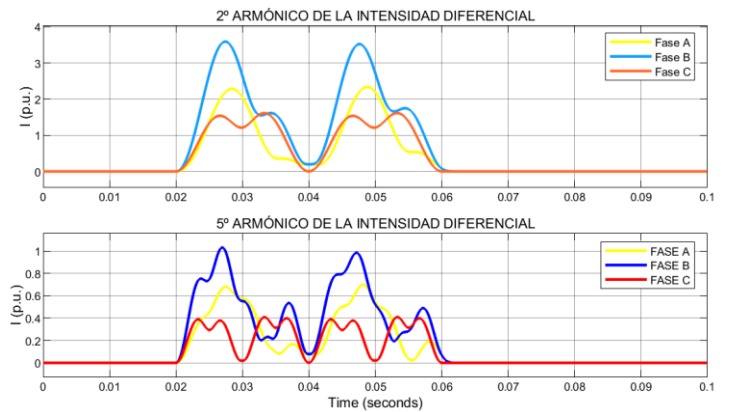


Figura 103 Segundo y quinto armónico de I diferencial

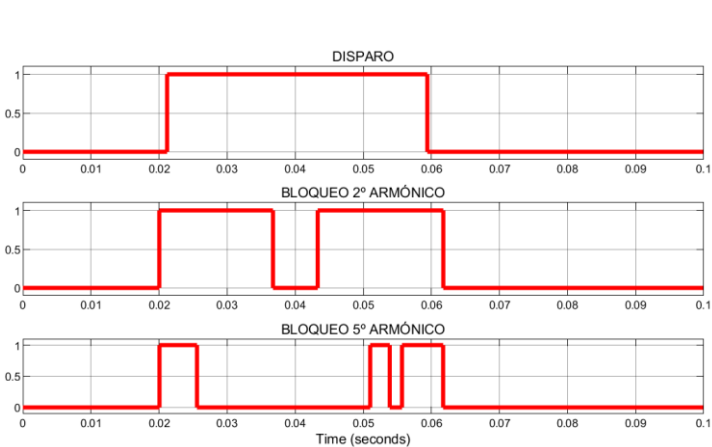


Figura 104 Funciones de disparo y bloqueo

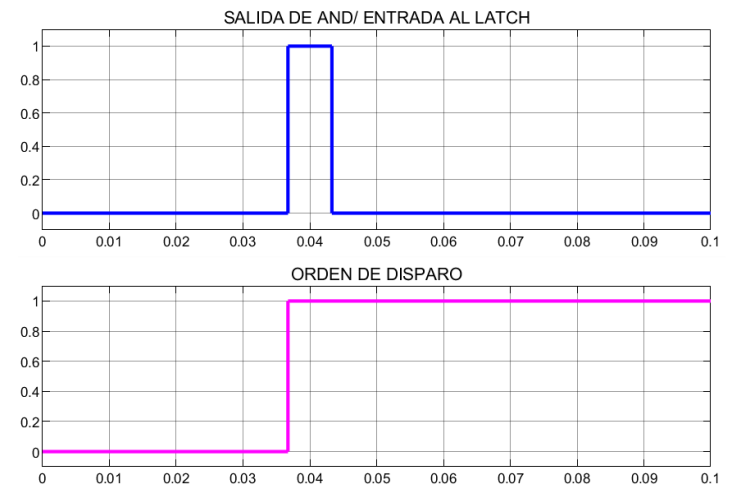


Figura 105 Orden de disparo

11.2.1.3 Falta interna trifásica

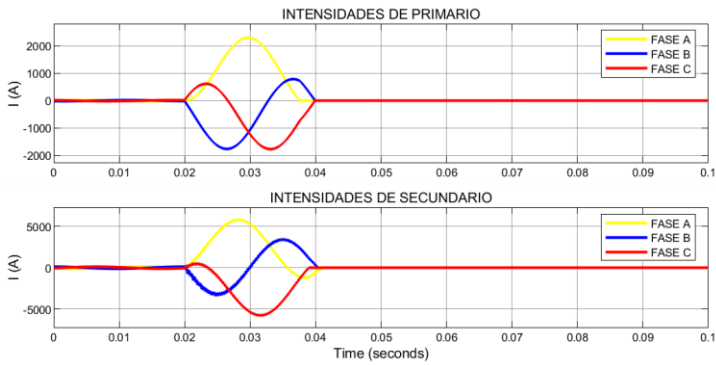


Figura 106 Falta interna trifásica

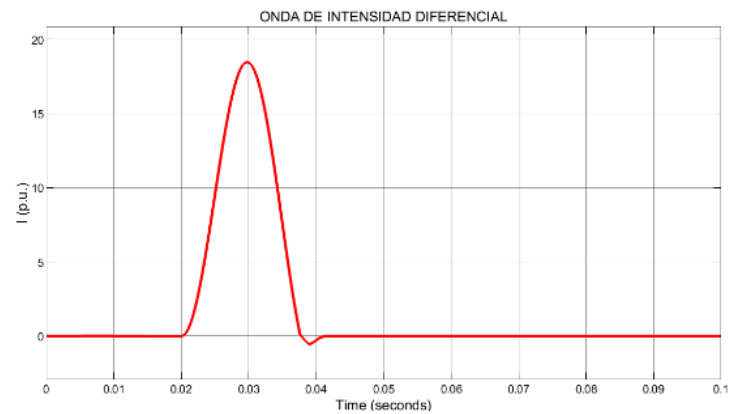


Figura 107 Onda de intensidad diferencial

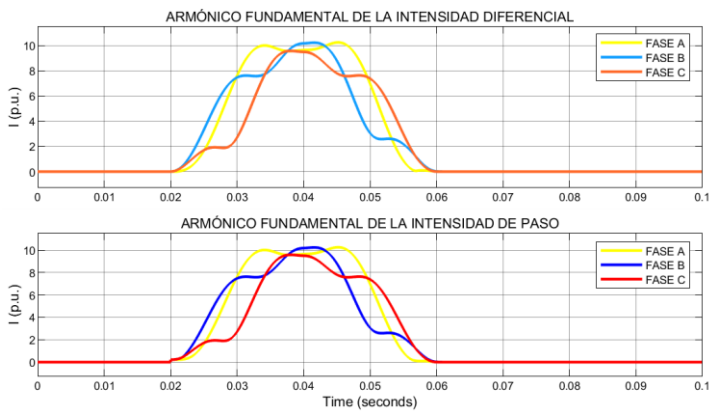


Figura 108 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso

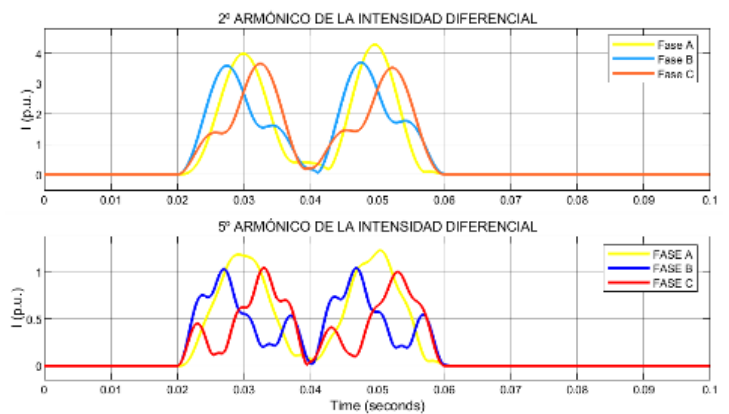


Figura 109 Segundo y quinto armónico de I diferencial

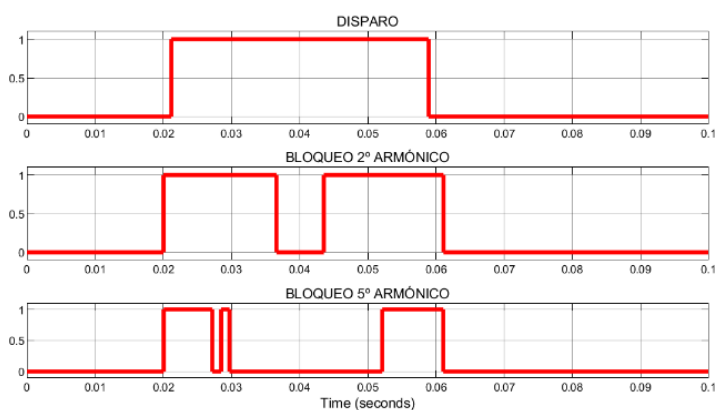


Figura 110 Funciones de disparo y bloqueo

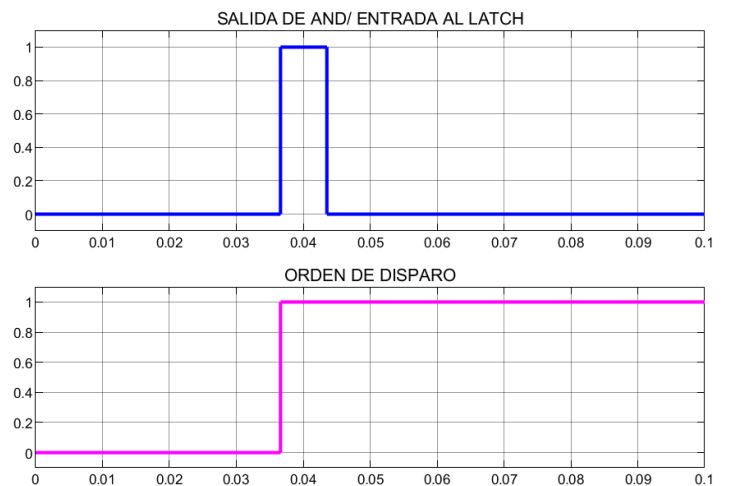


Figura 111 Orden de disparo

11.2.2 Faltas externas

11.2.2.1 Falta externa bifásica entre fases A y B

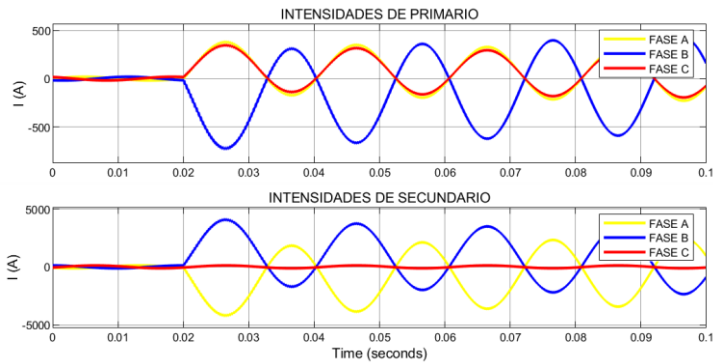


Figura 112 Falta externa bifásica en fases A y B

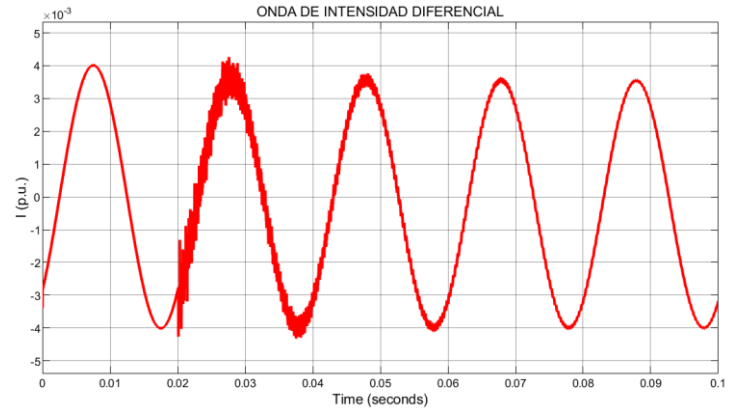


Figura 113 Onda de intensidad diferencial

V

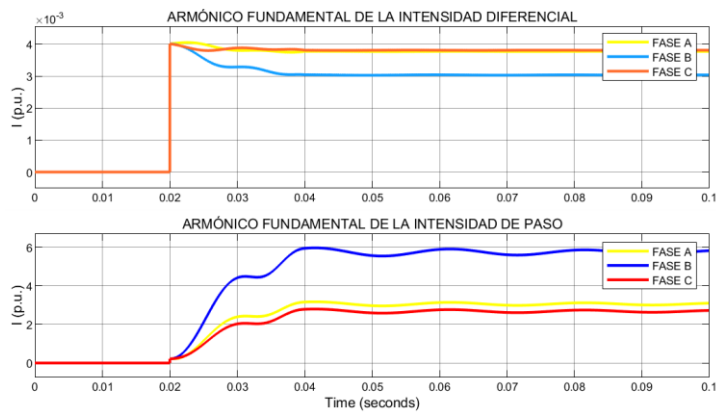


Figura 114 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso

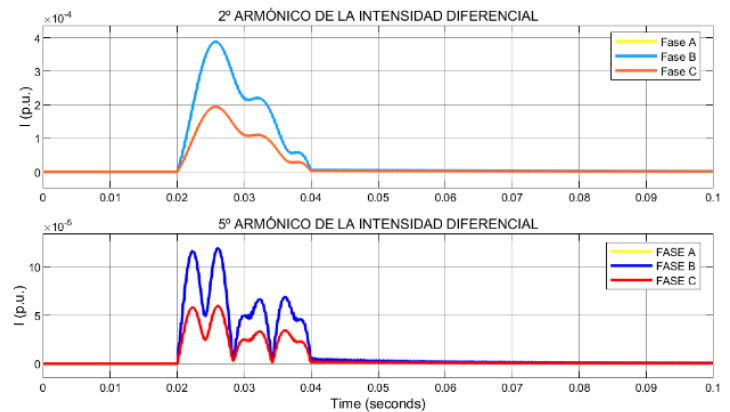


Figura 115 Segundo y quinto armónico de I diferencial

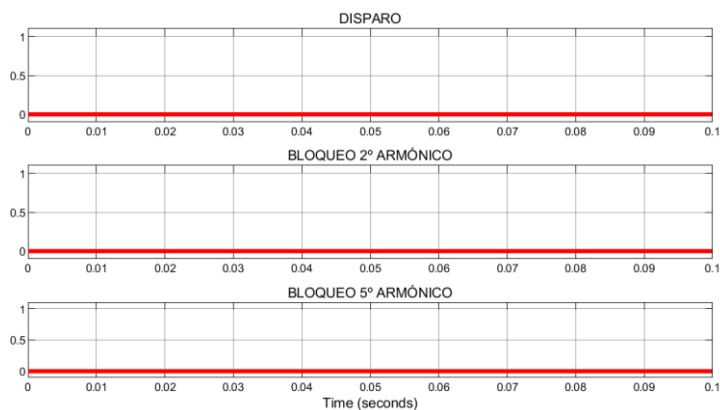


Figura 116 Funciones de disparo y bloqueo

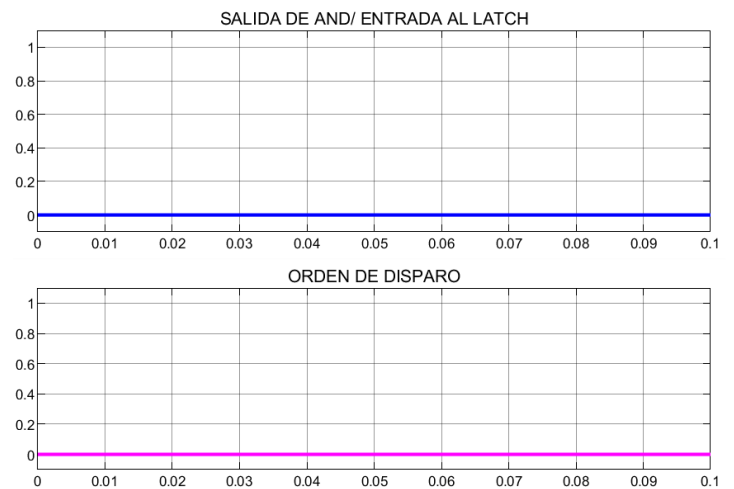


Figura 117 Orden de disparo

11.2.2.2 Falta externa bifásica a tierra entre fases A y B

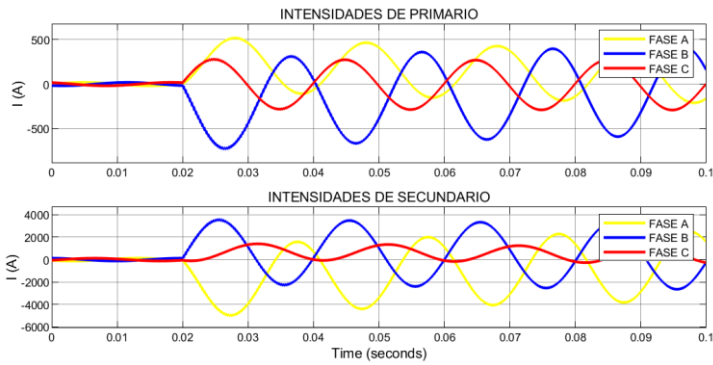


Figura 118 Falta externa bifásica entre A y B

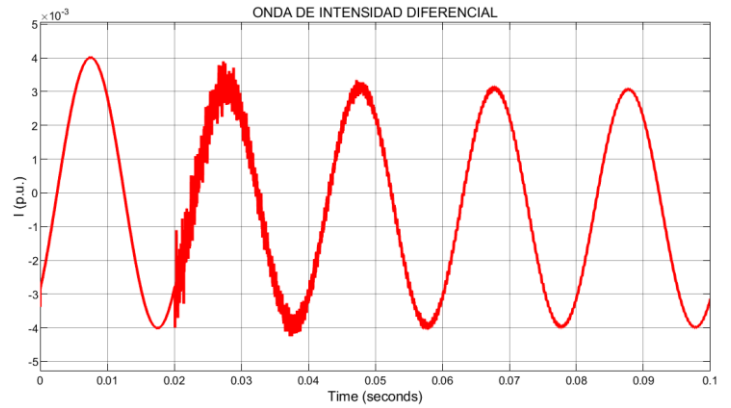


Figura 119 Onda de intensidad diferencial

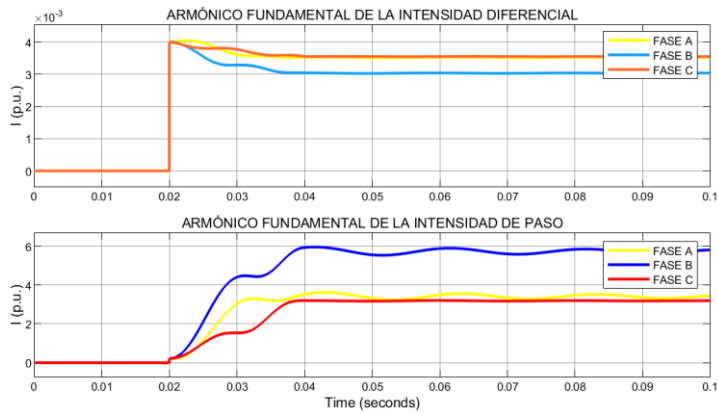


Figura 120 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso

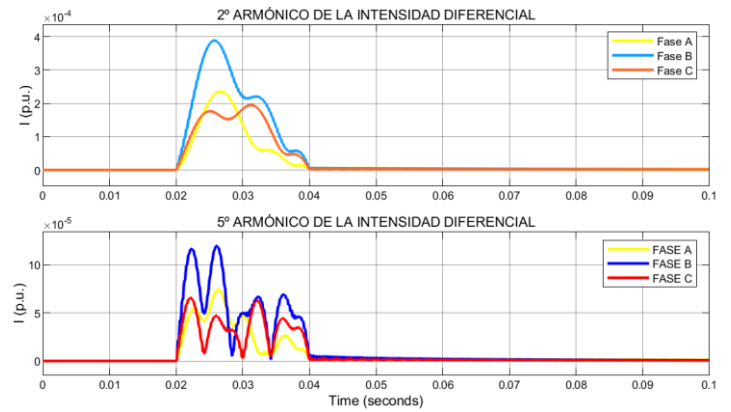


Figura 121 Segundo y quinto armónico de I diferencial

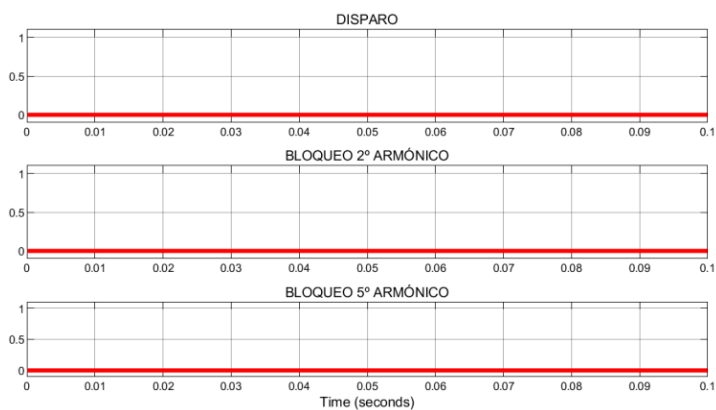


Figura 122 Funciones de disparo y bloqueo

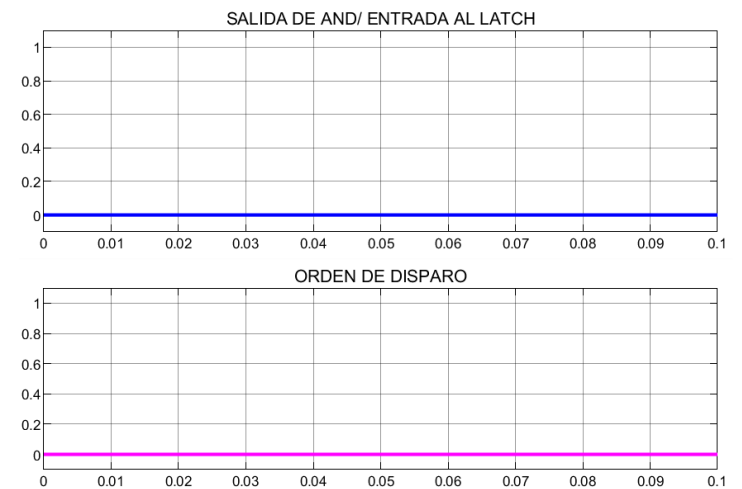


Figura 123 Orden de disparo

11.2.2.3 Falta externa trifásica a tierra

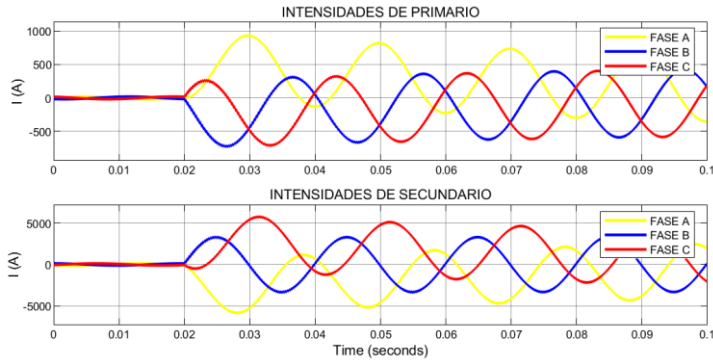


Figura 124 Falta externa trifásica

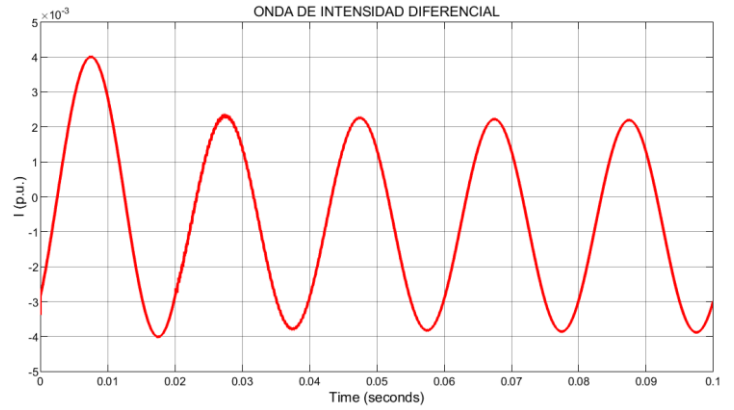


Figura 125 Onda de intensidad diferencial

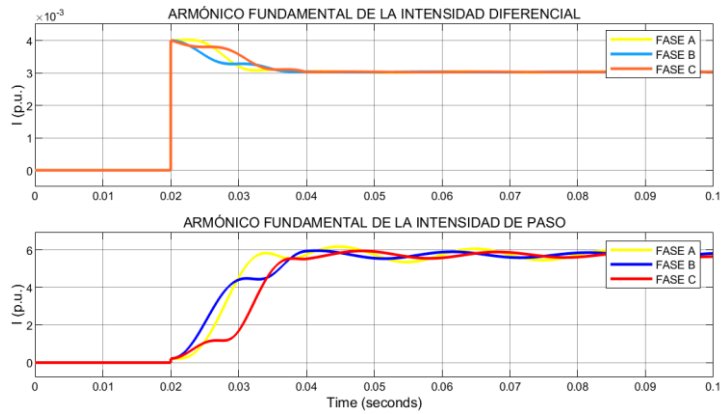


Figura 126 Armónico fundamental de I diferencial e I de paso

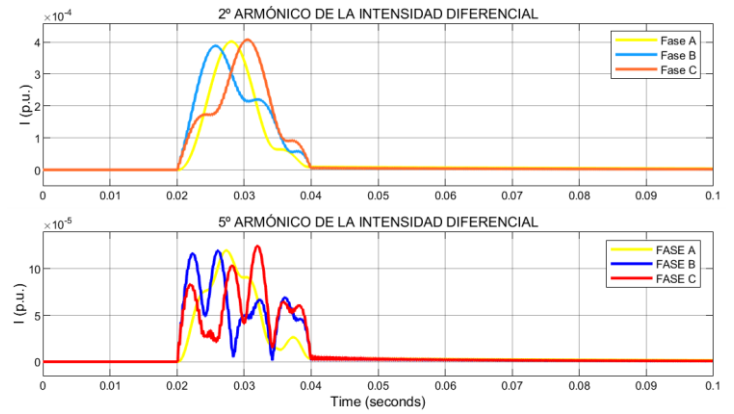


Figura 127 Segundo y quinto armónico de I diferencial

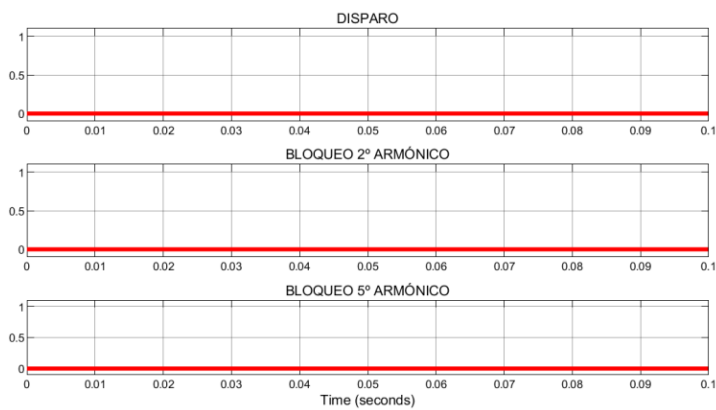


Figura 128 Funciones de disparo y bloqueo

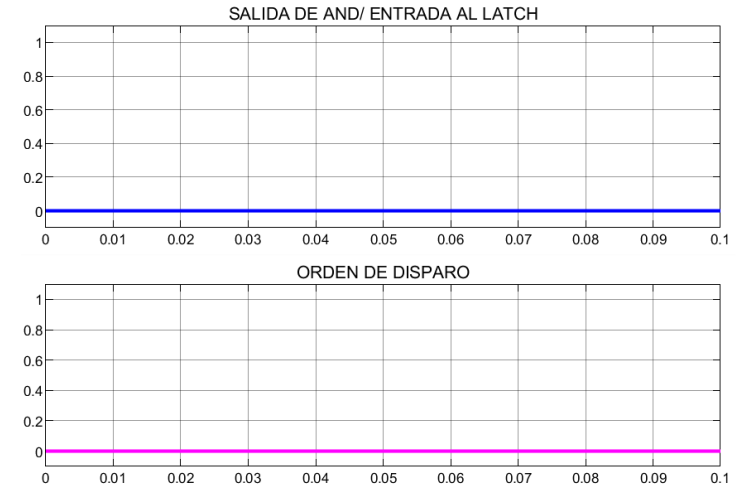


Figura 129 Orden de disparo

11.3 ANEXO II. Manuales

11.3.1 Manual de Matlab Simulink

Matlab y simulink (2019). Documentación y aplicación de MATLAB y Simulink. [En línea] Disponible en:
<https://es.mathworks.com/help/>

11.3.2 Manual de Microsoft Office

Microsoft office (2020) Ayuda y formación de Office. [En línea]. Disponible en
<https://support.microsoft.com/es-es/office?ui=es-es&rs=es-es&ad=es>

11.3.3 Manual de Protección Diferencial de Transformador

INGETEAM TECHNOLOGY, «Protección diferencial de transformador,» UME_INGEPAC_EF-TD_esp Rev.:
G (04/16).